RECHERCHES INTERNATIONALES
à la lumière du marxisme

PHYSIQUE



QUELQUES PROBLEMES PHILOSOPHIQUES

numéro **4** bimestriel

RECHERCHES INTERNATIONALES

à la lumière du marxisme

Rédaction du cahier n° 4

PIERRE CHARLES, EUGÈNE COTTON,

FRANÇOIS LURÇAT, PHILIPPE MEYER

Cahier n° 4

PHYSIQUE

Quelques problèmes philosophiques

PRESENTATION

Le matérialisme dialectique, conception de l'univers et science des lois les plus générales tant du monde extérieur que de la pensée humaine, ne s'appuie pas seulement sur les résultats des sciences humaines et sociales, mais aussi sur ceux des sciences de la nature. Il permet d'utiliser les méthodes et les résultats des diverses sciences pour aboutir à des généralisations aidant au développement de chacune d'entre elles.

Les progrès immenses réalisés par la science ne confirment pas seulement la valeur de celle-ci comme moyen de connaître la nature et d'agir sur elle, valeur que chacun reconnaît aujourd'hui. L'analyse de ces progrès et de la signification philosophique des théories récentes confirme et enrichit la conception matérialiste et dialectique du monde.

La science, d'autre part, n'a cessé d'illustrer la valeur de la conception et de la méthode du matérialisme dialectique. De grands savants ont affirmé la fécondité de cette philosophie et ont analysé au moins leurs propres résultats à la lumière du marxisme. D'autres savants défendent des conceptions voisines et leur matérialisme profond finit par abandonner la forme mécaniste périmée pour se rapprocher d'une conception dialectique.

Qu'il n'y ait pas d'équivoque : la physique est une et se développe dans tous les pays grâce aux recherches de savants d'idéologies diverses. Il n'y a pas pour nous de « physique socialiste » qui serait opposée à une « physique capitaliste ». Il nous apparaît cependant que la philosophie d'un savant réagit sur ses conceptions scientifiques et que l'interprétation idéaliste des résultats d'une science est fausse et conduit à de fausses conclusions sur la nature. Mais c'est une conception figée du matérialisme dialectique que de confondre ces

conclusions fausses avec les véritables résultats scientifiques et de rejeter ainsi ces derniers. C'est une démarche également simplificatrice qui a pu conduire parfois à juger de la valeur d'une théorie scientifique, non pas sur la conformité de ses résultats avec l'expérience, mais uniquement sur son apparente conformité avec des formulations du matérialisme dialectique.

C'est dans cet esprit que nous publions les textes que l'on va lire. Nous nous proposons par là plus qu'une tâche d'information sur un mouvement de pensée caractéristique de notre temps. Nous désirons contribuer à la réalisation de trois objectifs importants, que se fixent les physiciens et philosophes marxistes qui travaillent à la solution des problèmes idéologiques posés par la physique.

1° — *Au fur et à mesure que les sciences se développent, l'analyse de processus complexes, éloignés de notre expérience de tous les jours, conduit à des résultats qui paraissent contredire certains principes matérialistes, comme la causalité par exemple. Ces résultats sont utilisés et généralisés abusivement par les philosophes idéalistes (ouvertement idéalistes ou se réclamant du néo-positivisme, forme récente de l'empiriocriticisme), qui s'appuient sur les formulations douteuses de certains savants pour étayer leur lutte contre le matérialisme. Il est donc essentiel de réfuter ces interprétations idéalistes et de faire effort pour comprendre correctement les découvertes dont l'idéalisme a donné une image déformée.*

2° — *La diffusion des conceptions matérialistes dialectiques peut d'une part aider le public éclairé à mieux comprendre la signification de la science et d'autre part aider les savants eux-mêmes.*

3° — *Un dernier objectif est plus ambitieux : l'enrichissement du matérialisme dialectique. Comme l'écrit un récent éditorial des* Questions de Philosophie [1] : « *L'essentiel ne consiste pas à prouver sans cesse par de nouveaux exemples que le matérialisme dialectique est confirmé par les données des sciences de la nature, mais à résoudre les questions philosophiques venues à maturité dans la science et à développer le matérialisme dialectique lui-même. Les données de la science moderne ne doivent pas être considérées comme un simple réservoir où chercher de nouveaux exemples confirmant des thèses depuis longtemps formulées, mais comme l'objet d'une étude scientifique minutieuse nécessaire pour faire avancer et le matérialisme dialectique et la science* ».

1. Voir *La Nouvelle Critique*, n° 91.

En vue de ce triple objectif, il est important de publier et de discuter des textes qui étudient l'interprétation philosophique de ces problèmes, encore que celle-ci ne puisse naturellement être séparée arbitrairemant de l'aspect physique des questions abordées.

Ce cahier reproduit essentiellement des études consacrées à quelques-uns des problèmes que pose la physique théorique moderne, en premier lieu la mécanique quantique. Lorsqu'une nouvelle théorie bouleverse les notions acquises, lorsque les discussions et le bouillonnement des idées se multiplient au sujet de cette théorie, l'interprétation philosophique en est fort délicate. Mais, en même temps, ces problèmes sont ceux qui suscitent naturellement le plus de tentatives idéalistes pour extrapoler les notions nouvelles aux contours encore mal définis et utiliser ces extrapolations dans le combat contre le matérialisme. Il est donc indispensable que les marxistes s'expriment sur ces sujets.

Tel est le cas actuellement des problèmes de la mécanique quantique et de l'interprétation de ses fondements. Certains pourraient penser que les divergences entre marxistes sur ces problèmes, les imperfections philosophiques ou scientifiques de tel essai doivent nous inciter à attendre que des progrès plus décisifs soient accomplis. Nous ne partageons pas ce point de vue et nous estimons que nous devons publier des exemples de travaux effectués dans différentes directions. Nous estimons ainsi contribuer à la clarification philosophique de ces problèmes.

C'est pourquoi, sur l'interprétation de la mécanique quantique, nous publions dans ce recueil des travaux que l'on pourrait centrer autour de quatre positions différentes, plus particulièrement représentées sans doute par Vonsovski et Koursanov, par Vigier, par Sinelnikov et par Jànossy. Une autre étude est consacrée à la relativité, celle d'Alexandrov.

Pour la première fois, Recherches Internationales *publie une étude française. Bien que les marxistes de notre pays disposent de nombreux organes d'expression en langue française, il a semblé nécessaire que les sortes de « tours d'horizon » que constituent les cahiers de notre revue fassent désormais leur place à des contributions de marxistes français.*

Comme leurs collègues d'autres pays, physiciens et philosophes marxistes français ont des positions fort différentes sur certains des problèmes abordés ici ; par exemple, l'étude de J.-P. Vigier ne

représente l'opinion que de certains d'entre eux ; les physiciens qui ont collaboré à l'édition de ce cahier sont eux-mêmes partagés sur les conceptions exprimées dans cet article.

D'une façon générale, le choix des textes que l'on va lire n'implique pas une prise de position sur les problèmes débattus, mais s'explique principalement par des raisons historiques. Ces textes, en effet, s'insèrent dans des discussions dont il ne nous était matériellement pas possible de donner tous les éléments représentatifs. Nous avons voulu mettre à la disposition des lecteurs français une sélection, aussi valable que faire se peut sous un volume restreint, des études marxistes sur des problèmes philosophiques de la physique qui nous sont parvenues depuis la publication, il y a plus de 5 ans, d'un premier recueil de travaux soviétiques consacrés à ces problèmes. C'est pourquoi nous n'avons pas hésité à publier des textes relativement anciens, mais qui gardent encore leur intérêt et auxquels on se réfère parfois dans les discussions. Nous pensons offrir ainsi un instrument de culture et de travail scientifique. Nous nous proposons de publier, dans un avenir rapproché, un nouvel ensemble de textes où devront prendre place les contributions que l'actualité suggérera, aussi bien que des travaux provenant de courants et de directions de recherches marxistes, français et étrangers, qui n'ont pu être représentés ici.

Nous pensons que l'exposé de ces diverses thèses témoigne de l'importance que les chercheurs marxistes attachent à la libre confrontation des idées sur l'interprétation des résultats scientifiques déjà acquis et sur l'orientation des recherches nouvelles ; il montre la fécondité des discussions entre courants divers, discussions où, à chaque étape, c'est l'expérience qui permet de trancher. Dans ces essais apparaît aussi le souci de tenir compte de la valeur scientifique des savants de toutes conceptions philosophiques, idéalistes compris, et de discuter leurs interprétations avec sérieux, en allant jusqu'au fond des choses.

Nous nous sommes efforcés de choisir surtout des travaux accessibles à un large public cultivé et pas seulement aux spécialistes, mais présentant cependant de l'intérêt pour ces spécialistes, qu'ils soient philosophes ou physiciens. Nous croyons indispensable la collaboration entre ces philosophes et ces physiciens, nous espérons aider à cette collaboration et nous attendons les critiques et les suggestions que nous souhaitons avoir suscitées par la publication de ce cahier.

LA REDACTION.

LA NOTION DE MOUVEMENT DANS LA THEORIE QUANTIQUE RELATIVISTE

Les changements de propriétés des corps macroscopiques et des particules se réduisent pour la mécanique non relativiste — classique et quantique — aux changements de leur position dans l'espace, c'est-à-dire à leur mouvement au sens classique habituel du mot, tandis que les corps eux-mêmes ou les particules qui les constituent sont supposés absolument immuables.

Dans le cas des particules élémentaires — atomes, électrons, nucléons —, avec les processus de mouvement qui se manifestent, par exemple, dans la chambre de Wilson, à l'aide des traces que laissent ces particules, on observe des processus d'une tout autre espèce, caractérisés par l'apparition de nouvelles particules ou leur disparition (par exemple lors de l'émission ou l'absorption de photons), l'apparition et l'annihilation de paires d'électrons, ou enfin les transformations mutuelles de ces corpuscules (désintégration des mésons, processus β, etc.).

Ces processus contredisent radicalement les principes de la mécanique classique, dans la mesure où le fondement de ces derniers est le principe de l'immuabilité des particules élémentaires.

Pour dépasser ce principe, la théorie quantique des champs actuelle a créé un nouvel appareil, qui permet de décrire ces phénomènes et de calculer leur probabilité. A ce point, la vitesse de la lumière s'introduit dans la théorie d'une façon essentielle, liée à l'exigence d'invariance relativiste et en particulier à la loi d'équivalence de la masse et de l'énergie.

Dans la présente note je veux attirer l'attention sur la circonstance que cette théorie des transformations mutuelles des particules élémentaires (y compris leur création et leur annihilation,

seules ou par paires) n'a pas été appliquée jusqu'à présent à la question beaucoup plus simple de leur mouvement progressif habituel.

Or, ce dernier paraît pouvoir être considéré du même point de vue beaucoup plus général, c'est-à-dire comme la disparition de la particule en un point et sa réapparition en un autre point. Dans le cas des particules impaires, telles que par exemple les électrons, ce processus est lié à la création virtuelle d'une paire électron-positon et à l'annihilation de ce dernier avec l'électron considéré, qui est remplacé par le nouvel électron à un nouvel endroit.

C'est précisément à cette circonstance qu'est lié le phénomène de « tremblement » de l'électron, qui découle, d'après Schrödinger, de l'équation de Dirac. Dans la conception proposée, le fait ne consiste pas en un « tremblement » de l'électron, mais dans l'apparition virtuelle de paires électron-positon, qui est liée à une énergie $2mc^2$ (où m est la masse de l'électron) et à une fréquence

$$\nu = \frac{2mc^2}{h}.$$

De façon analogue, la diffusion de la lumière par un électron est liée, d'après I.-E. Tamm, au passage de ce dernier par un état intermédiaire à énergie négative, c'est-à-dire par conséquent à la création et l'annihilation d'une paire électron-positon, si on remplace les états à énergie négative vacants par des positons.

Il faut remarquer que l'équation de Dirac, strictement parlant, ne décrit pas le mouvement d'*une* particule, mais se rapporte à un nombre indéterminé de particules, et ne prend un sens physique déterminé que par la seconde quantification du champ de la fonction d'onde ψ de Dirac.

Dans le cas des photons, c'est-à-dire de particules de masse au repos égale à zéro, la notion de mouvement au sens habituel — classique — de ce mot perd tout sens ; il est impossible, comme on sait, de suivre ce mouvement par la méthode des traces, fait à quoi est liée aussi l'impossibilité de la description théorique d'un photon ou d'un ensemble de photons par la méthode des fonctions d'onde dans l'espace de configuration.

Le mouvement des photons se réduit à leur naissance en un endroit, c'est-à-dire leur émission, et à leur disparition en un autre endroit, c'est-à-dire leur absorption. Les états intermédiaires, qui correspondent au mouvement du photon sur un cône de lumière, n'entrent pas en fait dans la description de celui-ci.

Dans le cas des électrons et des autres particules de masse au repos différente de zéro, la théorie quantique admet une approximation non relativiste, qui « escamote » les processus de naissance et disparition de ces particules, et les traite de façon approchée comme immuables et éternelles, au sens de la mécanique classique.

La matière, dans la conception classique, se présente du point de vue physique comme un ensemble de particules élémentaires immuables ; du moment où ces particules peuvent apparaître, disparaître et se transformer l'une dans l'autre, cette conception corpusculaire doit être remplacée par une conception « de champ », c'est-à-dire par la conception d'un champ dynamique, qui engendre les particules et est porteur de toutes les propriétés mécaniques qui leur étaient assignées — énergie, quantité de mouvement, spin, etc...

La conservation de ces propriétés assure au champ cette réalité et cette immuabilité, qui caractérise la matière au sens le plus profond — philosophique — du mot. En ce qui concerne les particules, il faut les considérer de ce point de vue comme des modèles grossiers, à l'aide desquels nous essayons de nous représenter concrètement les effets quantiques du champ.

La naïveté de cette représentation appert de la considération, par exemple, du phénomène d'absorption de la lumière d'après la mécanique quantique. Ici, une lumière dont la longueur d'onde est très supérieure aux « dimensions » de l'atome, n'est pas en fait considérée comme une onde, mais comme un champ électromagnétique qui oscille harmoniquement dans le temps avec une fréquence suffisamment élevée.

Comme on le sait, cette représentation amène, pour l'énergie absorbée par l'atome, à la formule $h\nu = W_2 - W_1$, formule qui s'interprète comme expression de ce fait qu'une lumière de fréquence ν est formée de photons d'énergie $h\nu$.

Mais il est douteux qu'on puisse lier la notion de photons au champ électrostatique, ou même à un champ stationnaire oscillant dans le temps ne serait-ce que pour cette raison qu'à de tels photons il faudrait attribuer une impulsion égale à zéro.

Les « particules » dont d'après la conception habituelle, est formée la matière, représentent seulement les effets quantiques du champ, ce qui, d'ailleurs, explique l'identité des particules élémentaires d'une même espèce (par exemple des électrons), de même que l'identité des particules complexes (par exemple des atomes d'hydrogène) s'explique dans la théorie quantique habituelle — non rela-

tiviste — par les conditions de quantification de leur mouvement interne.

Dans une théorie strictement relativiste, cette notion de « mouvement interne » perd son sens et il devient indispensable de considérer les particules « complexes » comme des particules *élémentaires*, c'est-à-dire des points matériels doués de propriétés internes, qui ne peuvent être ramenées à un mouvement au sens de la mécanique quantique habituelle — non relativiste — que d'une façon approchée, dans la mesure où leur énergie de liaison est petite devant leur énergie au repos. J'ai analysé d'autre part[1] cette question beaucoup plus en détail.

Remarquons en conclusion que le traitement quantique relativiste ici exposé du mouvement des particules élémentaires comme leur *régénération* continuelle, écarte une série de difficultés gnoséologiques, qui dans la théorie non relativiste sont liées à ce qu'on appelle le « principe d'indétermination » et qui sont considérées par une série de physiciens et de philosophes d'orientation idéaliste comme une menace contre le principe du déterminisme, ou contre le principe de causalité.

Du point de vue de notre conception des « particules » comme modèles servant à décrire les effets quantiques du champ, et de leur « mouvement » comme régénération, il n'y a rien d'étonnant à ce que la notion de trajectoire des particules ne puisse posséder de sens déterminé, ce qui n'empêche cependant pas que le processus de « mouvement » des champs dynamiques quantifiés soit strictement déterminé.

Présenté le 14-12-1948.

J. FRENKEL

Доклады Академии Наук СССР. (*C.-R. de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*), 1949, LXIV (4), p. 507.

Traduit par François LURÇAT.

1. J. Frenkel, *Journal de Physique expérimentale et théorique*, 16, 326 (1946).

SUR LA SIGNIFICATION DE LA FONCTION D'ONDE

1. Il y a trois points de vue sur la signification de la fonction ψ (pour abréger nous parlons d'un électron) :

a) — ψ caractérise l'état objectif de l'électron.

b) — ψ « enregistre les renseignements sur l'état », l'état lui-même « se confond avec la notion : renseignements sur l'état » [7].

c) — ψ ne se rapporte pas à l'électron, mais à l' «ensemble » [9], [10].

Le but de cette note est d'approfondir le premier point de vue et de montrer que les deux autres, que nous appellerons respectivement « point de vue de Copenhague » et « point de vue statistique » sont faux. La fonction d'onde est définie par un « système complet de grandeurs » et détermine elle-même la probabilité d'obtenir par une mesure une valeur donnée d'une grandeur donnée. C'est pour cela que le problème de sa signification conduit au problème de la signification des concepts de mesure, de grandeur physique, de probabilité.

2. On ne doit pas comprendre le premier point de vue comme signifiant qu'il correspond toujours à un électron pris en soi une certaine fonction ψ, éventuellement inconnue. D'après la mécanique quantique, il ne correspond en général aucune fonction ψ à un électron dans un système complexe. Par suite, pour qu'un électron soit dans un état représenté par une fonction ψ, il faut certaines conditions. L'état de l'électron n'est pas quelque chose de déterminé par soi-même; il est *conditionné* par les relations de l'électron avec les autres objets.

La description de l'état par la fonction ψ se rapporte aux con-

ditions correspondantes : c'est une « description non absolue » [3]. Pris indépendamment des conditions, le concept de ψ devient un non-sens. Ceci est facile à comprendre à la lumière de la thèse générale de Staline. « ... N'importe quel phénomène dans n'importe quel domaine de la nature peut être converti en non-sens si on le considère en dehors des conditions environnantes » ([1], p. 93).

Mais pour que les conditions elles-mêmes puissent être considérées comme définies, elles doivent, dans une certaine mesure, être mises à part, en sorte que les « effets quantiques » ne soient pas sensibles pour elles, c'est-à-dire que les conditions doivent être « classiques ». (On ne peut évidemment pas dire que cette situation ne peut pas changer avec le développement de la théorie, mais c'est la situation en mécanique quantique). *Ainsi ψ décrit l'état de l'électron dans les conditions correspondantes, définies « classiquement »*.

3. L'affirmation répandue que « toute description de l'état (et même l'état lui-même) de l'électron apparaissent comme résultat d'une certaine mesure (cf. par exemple [8], p. 15) est fausse. L'état « apparaît » comme résultat des conditions correspondantes, tandis que la description de l'état provient en général, soit des hypothèses théoriques, soit de la fixation des conditions, ce qui est évidemment lié avec une mesure, mais en général celle-ci porte sur les conditions et non sur l'électron. Par exemple dans les expériences sur la diffraction on se donne de façon immédiate et on mesure le champ accélérateur (condition) mais pas l'impulsion des électrons. La mesure de l'impulsion, elle, perturbe l'impulsion (cf. par exemple [9], [10]).

Dans la discussion des expériences et du rôle de l'appareil, il faut distinguer :

a) — la « préparation de l'objet » et la création des conditions;

b) — l'effet (par exemple l'arrivée de l'électron sur la plaque photographique) ;

c) — l'observation.

Les deux premières parties sont objectives et peuvent avoir lieu dans la nature, indépendamment de l'homme ; ce sont elles que concernent les théories physiques. C'est pourquoi il faut entendre en mécanique quantique par « résultat d'une mesure » l'effet objectif de l'interaction de l'électron avec l'objet convenable. Il faut éliminer les discussions sur l'observateur et n'avoir affaire qu'aux conditions et effets objectifs. La grandeur physique est une caractéristique objective du phénomène et non le résultat d'une observation.

4. Tout ceci est embrouillé dans le point de vue de Copenhague. La dépendance de l'état par rapport aux conditions est remplacée par sa dépendance par rapport à l'observation; le non-absolu, le relatif, est compris comme subjectif. Les effets objectifs sont confondus avec l'observation et la grandeur physique est comprise, non comme une caractéristique objective du phénomène, mais comme le résultat d'une observation. L'électron est considéré, à proprement parler, comme une particule classique sur laquelle les renseignements sont limités par le « principe de complémentarité », c'est pourquoi ψ est privée de sens physique et ne conserve que le rôle d'un enregistrement symbolique de ces renseignements ou des « prédictions possibles » [7]. De sorte que l'interprétation de Copenhague de la fonction ψ est basée, entre autres, sur une confusion élémentaire entre concepts (voir critique dans [4], [6], [11]).

5. Une grandeur physique est une caractéristique objective de l'objet ou du phénomène. Puisque la mesure d'une même grandeur physique attachée à un électron dans un état déterminé peut donner des valeurs différentes, c'est-à-dire des effets objectifs différents, on ne peut pas dire que cet état est caractérisé par une valeur déterminée de la grandeur L. C'est pour cela qu'*en général, on doit considérer une grandeur, non comme une caractéristique de l'électron dans un état donné, mais comme une caractéristique de l'interaction de l'électron avec un autre objet*. De ceci il ne résulte pas que la grandeur cesse d'être objective mais elle n'appartient pas à l'électron en lui-même. Dans une telle conception il n'y a rien d'étonnant à ce que dans un état donné toute grandeur n'ait pas une valeur déterminée et que tout couple de grandeurs ne soit pas simultanément mesurable.

Toutefois, si, lors d'une mesure sur un objet donné dans des conditions données, il apparaît toujours le même effet, nous devons conclure que la propriété correspondante est inhérente à l'objet. Ceci est une des prémisses gnoséologiques fondamentales de la science de la nature.

Si la fonction ψ est fonction propre d'un opérateur L correspondant à une certaine grandeur physique, en effectuant la mesure nous trouverons la même valeur de L, et nous devons alors attribuer la propriété correspondante à l'électron dans un tel état, ce que l'on exprime en disant que l'électron a, par exemple, une impulsion déterminée, etc.

De cette manière *la fonction ψ caractérise les propriétés inhéren-*

tes à l'électron dans un état donné. (Notons que pour toute ψ on peut trouver des opérateurs L qui s'expriment en fonction des opérateurs coordonnées et impulsions et tels que $L\psi = \lambda\psi$. En ce sens toute ψ est définie par les valeurs de certaines grandeurs L et les détermine elle-même entièrement. C'est-à-dire que, de même qu'en mécanique classique, l'état est déterminé de façon univoque par les valeurs certaines d'un certain nombre de grandeurs, mais en même temps, contrairement au cas classique, toutes les grandeurs possibles pour un électron n'ont pas à la fois des valeurs déterminées.)

6. Toutefois, on a encore la possibilité de faire des mesures (interaction avec des objets « classiques ») dont le résultat n'est pas déterminé de façon univoque. Dans ce cas ψ détermine la probabilité du résultat. Mais comme ψ reflète l'état de l'électron, la probabilité elle aussi doit avoir un sens pour un seul électron. En fait, il en est bien ainsi, ce qui apparaît clairement si on définit la probabilité à partir de la catégorie dialectique de possibilité réelle.

La probabilité d'un effet donné, résultant d'un phénomène donné, est la mesure de sa possibilité dans des conditions données; elle est la caractéristique objective de la liaison entre le phénomène et les conditions. Les possibilités réelles sont inhérentes au phénomène dans les conditions données.

Lors de la reproduction des phénomènes dans les mêmes conditions, ces possibilités se transforment en réalités, et la probabilité se manifeste dans la fréquence de l'apparition de tel ou tel effet.

La probabilité ne se réduit pas à la fréquence de l'événement dans « l'ensemble ou le « collectif » mais elle se manifeste dans la fréquence et se mesure par la fréquence. (De façon analogue, par exemple, l'énergie ne se réduit pas au travail mais se manifeste dans le travail et se mesure par lui). Le « collectif » illimité est l'ensemble des phénomènes possibles dans les conditions données ; et nous aboutissons donc inévitablement au fait que la probabilité est la caractéristique numérique de certaines possibilités inhérentes à un type donné de phénomènes dans des conditions données. L'entropie, par exemple est le logarithme de la probabilité. Mais elle a une signification, par exemple, pour un gaz donné indépendamment du fait que l'ensemble de ses microétats possibles se réalise ou non; et il ne peut pas se réaliser de façon tant soit peu complète dans un bref intervalle de temps. Il en résulte que l'ensemble est ici l'ensemble des états *possibles*, tandis que l'entropie (probabilité) est la caractéristique objective du gaz dans des conditions macroscopiques (p et T) données, à l'aide du nombre des microétats possibles dans

ces conditions. De sorte que la probabilité est la mesure de la possibilité, tandis que l'ensemble est le résultat de la manifestation des différentes possibilités ou, dans un autre sens, un moyen théorique pour les représenter.

7. *Ainsi la fonction ψ est la caractéristique de l'état de l'électron dans des conditions déterminées, définies de façon macroscopique ; elle caractérise des propriétés inhérentes à l'électron dans cet état par les possibilités réelles des résultats de l'interaction avec d'autres objets.* Une forme particulière de combinaison de ces possibilités dans un état s'exprime par le principe de superposition. Le développement de ψ suivant les fonctions propres de l'opérateur L est la manifestation abstraite de telles possibilités, tandis que la mesure de la grandeur L en est la manifestation réelle, et c'est en cela que consiste le rôle de l'appareil de mesure. L'électron, comme tout objet est entièrement caractérisé par ses interactions possibles ([2], p. 233, [3], [4]).

8. Selon le point de vue statistique, « quand on dit qu'une particule se trouve dans un état caractérisé par la fonction d'onde ψ, il faut se représenter un grand nombre de telles particules qui, indépendamment les unes des autres, se trouvent dans le même état et qui, par conséquent, peuvent servir à reproduire un grand nombre d'expériences identiques. Un tel assortiment de particules s'appelle un ensemble pur... En conséquence l'état de la particule, caractérisé par la fonction d'onde, doit être interprété comme l'appartenance de la particule à un certain ensemble pur ». ([9], pp. 54-55). Cette définition contient un cercle vicieux, car on définit l'état à l'aide de l'appartenance à un « ensemble » et l' « ensemble » à l'aide de l'identité des états. En fait, l'état de l'électron se définit par les conditions. Dans [9] et [11] il est dit que l'ensemble se définit par des conditions macroscopiques. Mais le type de particule et les conditions dans chaque élément individuel de l'ensemble sont les mêmes, de sorte que ces données, et en même temps l'état (ψ) qu'elles définissent, se rapportent par là-même à l'élément de l'ensemble, c'est-à-dire à une particule dans des conditions données.

De plus, dans la seule ψ est contenu, pour ainsi dire, le continuum des possibilités pour les différentes grandeurs combinées de façons différentes; il est possible, par exemple, de mesurer l'impulsion et la coordonnée sur deux axes perpendiculaires quelconques. C'est pourquoi, pour la représentation théorique ou la manifestation expérimentale des différentes possibilités reflétées par ψ, il faudrait

se représenter, ou posséder expérimentalement une énorme quantité d'énormes « assortiments » de particules. C'est pourquoi un « ensemble », c'est-à-dire un assortiment d'un grand nombre de particules qu'il « faut s'imaginer », est une construction de l'esprit, insuffisante pour saisir le contenu du concept de fonction ψ. Si nous ne voulons pas examiner un ensemble de particules, mais un ensemble, collection d'expériences identiques, le contenu de ψ n'est pas épuisé par *une* telle collection, car il inclut la possibilité de mesurer des grandeurs *différentes,* auxquelles correspondent des collections statistiques différentes d'expériences possibles.

Lier obligatoirement ψ avec un ensemble de particules, cela aurait un sens s'il existait des « paramètres cachés », se rapportant à une particule et déterminant le résultat d'une mesure. Mais on sait, et il est aisé de le montrer (cf. par exemple [11]), que l'hypothèse de tels paramètres cachés contredit la mécanique quantique; de toute façon, le résultat d'une mesure doit être déterminé, d'une façon générale, non seulement par l'état de la particule, en tenant compte des paramètres cachés, mais aussi par l'état de l'appareil. Par suite, l'état de la particule (même complété par de nouveaux paramètres) définit justement la possibilité de tel ou tel résultat. En un mot, on ne peut comprendre le sens de ψ sans la notion de possibilité, et l'ensemble ne peut remplacer cette notion.

L'affirmation que la fonction ψ et en général la mécanique quantique ne concernent *que* les ensembles est erronée. De cette affirmation, il suit nécessairement, par exemple, que les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion (qui sont partie intégrante de la mécanique quantique) ne concernent elles aussi *que* l'ensemble, ce qui, comme on sait, est faux. De plus, ψ peut être définie par une grandeur (ou plusieurs), par exemple comme fonction propre de l'opérateur énergie. Dans ce cas, l'énergie appartient à un atome et l'ensemble ne joue aucun rôle. Le point de vue statistique, qui attribue ψ, et même les grandeurs physiques [10], au seul ensemble, nie par là même que la notion d'état stationnaire pour un atome ait un sens. Il n'admet pas cette prémisse, que si lors de différentes mesures c'est toujours le même effet qui se produit, alors l'objet possède la propriété correspondante. L'objet de la théorie n'est plus l'objet, mais une collection d'expériences ; non seulement la mécanique quantique, mais aussi la mécanique classique sont proclamées théories statistiques ([10], p. 355). En fait, la mécanique quantique ne se réduit pas à une statistique portant sur les expériences, bien

qu'elle inclue cette statistique; elle est une théorie des processus objectifs — individuels et collectifs.

En conclusion, l'auteur est heureux de remercier V. A. Fock pour la discussion des idées exposées dans cette note.

A. D. ALEXANDROV.

О значении волновой функции. Доклады Академии Наук СССР. (*C.R. de l'Ac. des Sc. de l'U.R.S.S.*), 1952, t. 85, n° 2, p. 291.
Traduit par G. JAKOBI.

BIBLIOGRAPHIE.

1. — Histoire du P.C. (b) de l'U.R.S.S., Editions Sociales 1946, p. 93.
2. — F. Engels : *Dialectique de la Nature*, Ed. Sociales 1952, p. 233.
3. — V. A. Fock : *Vestnik* (Courrier) *de l'Université de Leningrad*, n° 4, 1949.
4. — A. D. Alexandrov : *ibid.*
5. — V. A. Fock : *Uspèkhi Fizitcheskikh Naouk*, 45, n° 1, 1951.
6. — A. D. Alexandrov : *Doklady* de l'Ac. des Sc. de l'U.R.-S.S., 84, n° 2, 1952.
7. — V. A. Fock, A. Einstein, N. Bohr : *Uspèkhi Fizitcheskikh Naouk*, 16, n° 4, 1936.
8. — L. Landau, E. Lifchitz : *Mécanique quantique*, 1948.
9. — D. I. Blokhinzev : *Principes de mécanique quantique*, 1949.
10. — L. I. Mandelchtam : *Œuvres*, t. 5, 1950.
11. — D. I. Blokhinzev : *Uspèkhi Fizitcheskikh Naouk*, 45, n° 2, 1951 [traduction dans *Questions Scientifiques*, t. 1 (Physique), Editions de la nouvelle critique, 1952].

LES ASPECTS PHYSIQUES DU PROBLEME ONDE-CORPUSCULE

I. Introduction.

§ 1. La théorie quantique orthodoxe, c'est-à-dire la théorie telle qu'elle a été formulée par Bohr, Heisenberg et leurs écoles, arrive à des conclusions concernant la causalité, l'influence de l'observateur sur l'objet de l'observation, etc., que de nombreux physiciens ont été incapables d'accepter d'un point de vue général; néanmoins on s'est généralement résigné à ces formulations paradoxales à cause du grand succès de la théorie quantique. Le nombre de résultats nouveaux obtenus à partir de la théorie quantique est en vérité des plus impressionnants. Ces conclusions « paradoxales » sont en fait des vues positivistes et idéalistes. La théorie physique elle-même doit, cependant, toujours être édifiée sur le concept d'un monde existant indépendamment de notre conscience de lui, c'est-à-dire sur une base matérialiste. Ainsi, il y a un conflit aigu entre des formulations idéalistes et des concepts matérialistes par nature. Ce conflit a non seulement conduit à des vues déformées mais, à notre avis, il a handicapé le développement de la théorie. Ce sont les problèmes que nous traitons dans cet article, non d'un point de vue philosophique mais du point de vue du physicien qui souhaite clarifier certains problèmes physiques dont la théorie actuelle est incapable de venir à bout.

L'école des physiciens soviétiques [1], [2], [3] a montré clairement que les conclusions philosophiquement inacceptables de la théorie quantique orthodoxe peuvent être séparées des parties physiques de la théorie elle-même. Ainsi, le « principe de complémentarité » de Bohr n'est qu'un poids qui pèse sur la théorie; aucun résultat réel ne peut en être déduit et il rend ainsi, c'est le moins qu'on puisse en dire, plus difficile d'arriver à une représentation claire de la réalité.

Mais il y a aussi d'éminents physiciens occidentaux qui n'acceptent pas sans critique les idées philosophiques mises en avant par l'école de Bohr. Il y a tout d'abord Einstein [4], De Broglie [5] et Vigier [6] qui sont mécontents de la théorie ; ce travail était presque terminé quand parut un article de Bohm [7] sur le même sujet. Un autre exemple est celui de Planck qui, dans une conférence donnée en 1937, a critiqué très clairement les conceptions positivistes de la théorie quantique [8]. Planck fit même une tentative pour modifier cette théorie afin d'en éliminer certaines difficultés conceptuelles [9]. D'autres physiciens partagent des points de vue similaires. Nous citons, en appendice à cet article, une de ces vues critiques.

Dans le présent travail, nous ne nous limiterons pas essentiellement à une critique philosophique de la théorie quantique. Nous tenterons d'analyser les résultats des expériences réelles sur lesquels la théorie est fondée. En particulier, nous chercherons quelles sont celles des conclusions de la théorie orthodoxe qui résultent nécessairement des résultats expérimentaux. Le résultat de cette analyse, en accord avec les critiques rappelées ci-dessus, est qu'il n'y a pas de nécessité réelle à admettre l'interprétation idéaliste des résultats expérimentaux sur lesquels repose la théorie quantique. Je suis parvenu à la conclusion qu'à la base de la difficulté se trouve le fait suivant : la théorie quantique dans sa forme actuelle est une théorie incomplète et les conclusions idéalistes et positivistes qu'on en tire sont des tentatives pour cacher ce caractère incomplet de la théorie.

Ce qu'on appelle la démonstration de von Neumann, sur le fait que la théorie quantique ne peut être complétée par l'introduction de paramètres cachés qui la rendrait déterministe, n'affecte pas nos considérations. Neumann prouve seulement que si nous acceptons la théorie quantique comme un tout, aussi bien les parties démontrées que la partie spéculative, alors la théorie n'est pas déterministe (cf. aussi L. De Broglie). Cependant, il n'y a pas de raison réelle d'accepter tout ce que la théorie quantique prédit. Nous essayons dans notre analyse de nous limiter aux faits expérimentaux raisonnablement certains. Notre analyse traite ainsi surtout de résultats expérimentaux réels et, en ce qui concerne les expériences idéalisées, seulement de celles qui ne le sont que raisonnablement. En essayant d'analyser de telles expériences nous tirons la conclusion qu'elles peuvent en principe être décrites par un modèle beaucoup plus proche d'un modèle classique qu'on ne le croit généralement possible.

Naturellement, ce modèle n'est pas absolument en accord avec la théorie quantique. Il y a des cas où le modèle qualitatif que nous proposons conduit à des résultats qui diffèrent de ceux que laisserait attendre l'application stricte de la théorie quantique. Cependant, les divergences apparaissent dans un domaine où on a imaginé beaucoup d'expériences idéales mais où aucune expérience réelle n'a été entreprise. Ainsi, notre modèle est en accord avec toutes les expériences *réelles* mais prédit que quelques-unes des expériences idéales, si on parvenait à les réaliser, pourraient conduire à d'autres résultats que ceux qui sont habituellement supposés.

Les désaccords entre le modèle proposé et la théorie quantique orthodoxe se manifestent principalement quand on applique la théorie quantique à des processus macroscopiques, tandis que rien n'est changé aussi longtemps que l'on s'adresse aux processus microscopiques. La présente tentative offre une certaine similarité avec celle de Bohm [7], où on envisage cependant des changements dans la description des processus à très petite échelle. J'ai eu connaissance de son article après que ce travail était presque complètement terminé. En outre, beaucoup des idées mises en avant dans mon article ont été suggérées et discutées antérieurement par plusieurs autres auteurs. Je pense, en particulier, aux premiers articles de De Broglie et aux très intéressants articles de Blokhinzev [1 b]. Ce qui peut être nouveau ici provient de ma tentative d'introduire simultanément beaucoup de ces idées et de donner ainsi un tableau complet.

La principale faiblesse des considérations envisagées ici vient de mon incapacité à proposer actuellement le modèle autrement que de manière qualitative. Cependant j'espère avec cet article attirer l'attention sur le problème de façon suffisante pour susciter un effort dans cette direction, effort qui pourrait conduire à la solution quantitative. Pour le moment, j'essaie surtout de montrer qu'en dépit de la conviction contraire généralement admise, un modèle des processus quantiques est possible, au moins en principe.

2. Propriétés ondulatoires et corpusculaires et expériences.

§ 2. *Analyse des expériences*. De nombreuses expériences de montrent très clairement : les unes, l'aspect ondulatoire, les autres l'aspect corpusculaire des électrons, photons ou autres particules

élémentaires. Des difficultés surgissent si nous voulons interpréter ces résultats simultanément. Il existe un point de vue suivant lequel il n'est « pas permis » de considérer simultanément de telles expériences : on prétend que mélanger les deux aspects ne conduit pas à des résultats raisonnables. Or, à notre avis, il est tout à fait vrai que des paradoxes se présentent si l'on fait ressortir simultanément les aspects ondulatoire et corpusculaire. Cependant ces paradoxes ne peuvent être évités en postulant qu'on ne doit pas y penser.

Nous allons décrire de manière qualitative quelques expériences importantes, et les analyser du point de vue des problèmes ci-dessus indiqués.

§ 3. *Propriétés ondulatoires*. Considérons un écran I avec deux fentes A et B. Un second écran II est placé en face (voir *fig.* 1). Une onde plane tombe sur I ; si la fente B est seule ouverte, nous obtenons sur II un éclairement uniforme en face de la fente. Si les fentes A et B sont toutes deux ouvertes, il apparaît sur l'écran II une figure d'interférence, pour laquelle l'éclairement en chaque point diffère de la somme des éclairements résultant de l'ouverture de chacune des fentes séparément.

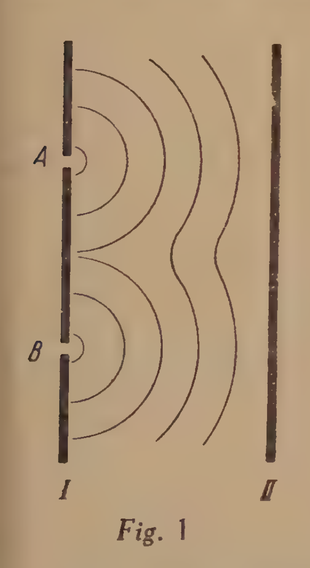


Fig. 1

Le phénomène est bien expliqué si l'on suppose que l'onde plane tombant sur A et B forme des ondes cylindriques axées sur A et B. Une telle onde cylindrique tombant sur II donne lieu à une distribution uniforme d'éclairement. Si les deux ondes cylindriques peuvent se former, elles interfèrent et donnent naissance à la figure d'interférence.

Cette expérience ainsi conduite avec la lumière démontre clairement la nature ondulatoire de celle-ci. Une expérience correspondante effectuée avec un faisceau d'électrons démontre de manière similaire la nature ondulatoire d'un tel faisceau. (On ne peut utiliser deux fentes dans le cas des électrons, mais on doit utiliser à la

place un réseau cristallin; cependant la diffraction par un tel réseau ne diffère pas en principe de celle provoquée par deux fentes.)

Il y a beaucoup d'autres phénomènes d'interférence; ils prouvent avec une grande précision que la lumière est un phénomène ondulatoire et, de plus, que ces ondes sont de nature électromagnétique et obéissent aux équations de Maxwell. En particulier, il y a d'intéressantes expériences qui montrent qu'un atome rayonnant émet des ondes sphériques avec une polarisation correspondant à un rayonnement dipolaire; de telles expériences ont été réalisées par Selényi en 1911 [10] et, indépendamment, par Schrödinger [12]. Ces expériences montrent que les parties d'ondes sphériques émises

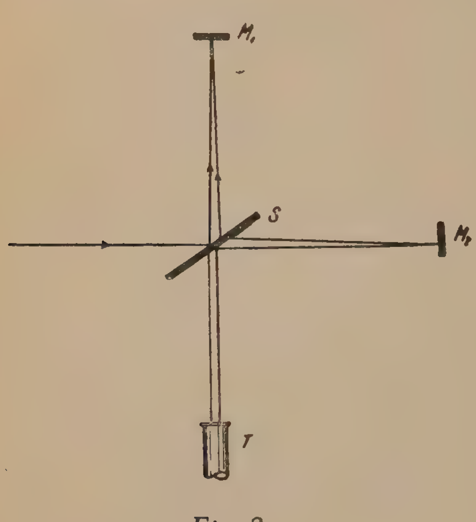


Fig. 2

dans différentes directions peuvent interférer l'une avec l'autre. L'interférence se produit justement dans la mesure et avec le degré de polarisation [11] prévus théoriquement lorsqu'on suppose le rayonnement constitué d'ondes sphériques émises par des dipôles.

Un type particulier d'expérience d'interférence est la réflexion d'un faisceau de lumière par la surface d'un solide transparent ou d'un miroir. Un faisceau de lumière peut ainsi être partagé en deux ; les deux faisceaux sont cohérents et si on les renvoie dans la même région ils donnent lieu à des franges d'interférence. Le dispositif type est celui de l'interféromètre de Michelson (voir. *fig.* 2).

§ 4. *Propriétés corpusculaires.* Le caractère corpusculaire de la lumière est démontré par l'effet photoélectrique d'Einstein. Un faisceau de lumière est composé de photons individuels, chacun portant une énergie $h\nu$. Comme ces photons sont indépendants l'un de l'autre, un faisceau peu intense présente des fluctuations d'intensité. De telles fluctuations ont été étudiées de façon approfondie par Vavilov [13].

La composition d'un faisceau de photons peut être aussi démontrée à l'aide de photomultiplicateurs d'électrons. Ce dernier instrument donne une réponse à l'arrivée d'un seul photon incident. Un seul photon tombant sur la photocathode du multiplicateur, s'il donne lieu à l'émission d'un photo-électron, provoque une avalanche électronique qui, au moyen d'amplificateurs, actionne un dispositif mécanique. Ainsi, au moyen du photomultiplicateur nous sommes capables de compter directement les photons d'un faisceau [1].

Au moyen d'un photomultiplicateur, nous pouvons mesurer l'intensité d'un faisceau par le nombre de photons par seconde et par unité de surface. Nous pouvons ainsi mesurer la distribution d'intensité, par exemple dans une figure d'interférence. De même nous pouvons déterminer le rapport des intensités correspondant aux deux parties d'un faisceau divisé en comptant les photons qui suivent chacune des voies.

Aussi longtemps que nous mesurons de grandes intensités, nous pouvons dire que, considérant seulement une seule fréquence ν, la densité de photons dans chaque région illuminée d'un système est proportionnelle à la densité énergétique calculée à partir des équations de Maxwell.

De nouveaux problèmes se posent, cependant, si nous considérons de faibles intensités lumineuses correspondant à quelques photons seulement.

§ 5. *Comportement des photons individuels.* Considérons une faible source de lumière qui émet N photons par seconde dans un

1. L'efficacité du photomultiplicateur pour enregistrer les photons isolés est de l'ordre de 1/20 à 1/200 suivant les détails du montage. Cette efficacité dépend de la probabilité pour un photon tombant sur la cathode de donner naissance à un photo-électron. Ainsi le photomultiplicateur ne compte pas chaque photon mais en compte seulement un sur n, où n est une caractéristique du photomultiplicateur. Ainsi certaines précautions sont nécessaires quand on interprète les résultats du comptage de photons.

faisceau parallèle. Si nous plaçons devant la source un volet qui, lorsqu'on l'actionne, s'ouvre pendant un temps $\tau \ll 1/N$ alors, pour la plupart des mises en œuvre du volet aucun photon ne s'échappe. Mais, dans les cas où les photons s'échappent, ils passent pour la plupart isolément et il arrive rarement qu'un groupe de plusieurs photons puisse s'échapper. Une telle source de lumière peut être réalisée en pratique et elle fournit des photons individuels bien séparés.

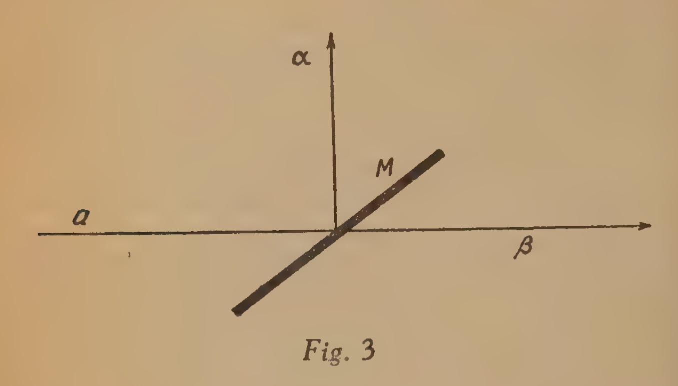


Fig. 3

Nous considérons ce qui se passe si nous envoyons des photons isolés, l'un après l'autre, sur un dispositif optique. Le cas le plus simple est celui d'un faisceau tombant sous une incidence de 45° sur une lame semi-argentée M (voir *fig.* 3).

Le faisceau est partagé entre α et β, faisceaux réfléchi et transmis. Qu'arrive-t-il à chaque photon ? L'expérience montre que chaque photon est soit réfléchi soit transmis, si nous devons fonder notre conclusion sur le résultat expérimental suivant [2]. Un photomultiplicateur est placé dans le faisceau α et un autre dans le faisceau β. Si un photon se divisait en deux, il donnerait lieu à une coïncidence entre les photomultiplicateurs. L'expérience a montré cependant que deux photomultiplicateurs de la sorte n'enregistraient pas de coïncidence en dehors des coïncidences fortuites qui sont causées par des photons indépendants réunis accidentellement dans les mêmes intervalles de temps. Ainsi, chaque photon tombe sur l'un des photomultiplicateurs seulement.

2. Voir l'appendice II.

Un comportement similaire est attendu de la part de photons individuels tombant sur un réseau. Chaque photon passe à travers le réseau et, ensuite, se rend sur l'écran où la figure d'interférence apparaît. Si nous remplaçons l'écran par une série de photomultiplicateurs dont les photocathodes couvrent l'aire de l'écran, alors chaque photon actionnera (au plus) un photomultiplicateur. Ainsi chaque photon apparaît en un point de l'écran seulement.

En répétant une telle expérience plusieurs fois, en lançant ainsi un photon après l'autre sur le réseau et en marquant les emplacements où les photons sont détectés, une figure d'interférence apparaîtra graduellement. Nous nous attendons à trouver le nombre relatif des photons tombant sur les photomultiplicateurs individuels proportionnel, compte tenu des fluctuations statistiques, à l'intensité de la figure d'interférence, intégrée sur la surface de la photocathode de l'appareil considéré.

Le trait remarquable de cette expérience est que les photons ainsi employés sont nécessairement indépendants l'un de l'autre. Les intervalles de temps entre deux photons successifs peuvent vraiment être rendus arbitrairement grands, de manière à rendre impossible toute connexion entre ces deux photons. De plus, au lieu d'envoyer par exemple 1000 photons sur un tel dispositif nous pouvons prendre 1000 dispositifs similaires et envoyer chacun des 1000 photons sur l'un d'entre eux; il n'est guère douteux que les résultats de ces 1000 dispositifs redonneront la même figure que celle obtenue à partir des 1000 photons tombant sur un seul dispositif.

L'expérience ci-dessus n'a pas été encore réalisée de la manière décrite ici ; néanmoins, elle donnerait sans doute le résultat annoncé si elle était réellement effectuée. Nous en sommes certains pour deux raisons : 1. Les expériences de Vavilov [13], qui montrent que les fluctuations d'intensité dues à la structure photonique de la lumière sont indépendantes en différentes régions d'une figure d'interférence. 2. La figure de diffraction produite par un réseau est indépendante (dans un grand domaine de variation) de l'intensité de la lumière utilisée.

De 1 nous retenons que les fluctuations indépendantes indiquent l'arrivée de photons indépendants en différentes régions cohérentes de l'image. De 2 nous concluons que si la figure d'interférence était en quelque manière liée à l'interaction de photons, cette interaction serait nécessairement réduite si l'intensité lumineuse et, par suite,

la densité de photons était réduite. Il n'y a aucun indice de l'existence d'un tel effet.

Nous avons ainsi de bonnes raisons de supposer que la figure d'interférence produite par un réseau vient des contributions individuelles et indépendantes de chaque photon. Ainsi chaque photon, quoique absorbé en un point donné, contient *tendanciellement* l'ensemble de la figure d'interférence. Chaque photon interfère avec lui-même et est éventuellement absorbé de préférence dans une région où la figure d'interférence présente une grande intensité.

3. Synthèse des propriétés ondulatoires et corpusculaires.

§ 5. Si on considère simultanément les expériences d'interférence et celles mettant en jeu l'aspect photon, l'image suivante semble rendre compte d'une manière adéquate des deux types de phénomènes en même temps. La lumière est émise par quanta. Une fois qu'un quantum est émis, il prend la forme d'un champ électromagnétique et se déplace en satisfaisant aux équations de Maxwell. Le champ persiste jusqu'à ce que le photon soit absorbé ; dans le processus d'absorption, le quantum apparaît comme un photon. On doit supposer que l'absorption est une interaction particulièrement violente du champ électromagnétique avec un atome ou un électron (la violence de l'interaction peut être causée par une sorte de résonance). Comme résultat de cette interaction, le champ ondulatoire tout entier est obligé de se contracter et il est « avalé » par le centre absorbant. Un centre absorbant a d'autant plus de probabilité d'absorber le photon que l'intensité du champ au voisinage immédiat de ce centre est plus grande au moment de l'absorption.

Pour compléter cette image, nous devons considérer aussi la possibilité qu'un photon commence à interagir violemment avec plusieurs centres absorbants en même temps, de telle manière que chacun des centres réussirait à absorber l'onde si les autres centres n'avaient pas été rencontrés. Dans un tel cas, on doit supposer qu'il se produit un processus compliqué, le processus finissant lorsqu'un des centres réussit à surmonter les interactions des autres et absorbe la totalité du photon.

Le modèle ci-dessus rend compte qualitativement à la fois des interférences et des propriétés mettant en jeu l'aspect photon. Ce modèle semble être le seul mode naturel et accessible d'interprétation des résultats expérimentaux réellement établis. Cette image n'a, cependant, jamais été prise sérieusement en considération auparavant car elle entraîne deux difficultés. Nous les considérons ci-dessous.

1. La constriction de l'onde exige une certaine action se propageant à une vitesse supérieure à celle de la lumière. En effet, si une onde sphérique émise à partir de O rencontre un point A où l'interaction se produit, pour étendre l'interaction à la partie de l'onde qui s'éloigne de A on doit supposer une action se déplaçant à une vitesse supérieure à celle de la lumière, pour pouvoir rattrapper la partie de l'onde se déplaçant dans la direction opposée.

A notre avis, ce n'est pas une difficulté réelle; nos vues sur les vitesses supérieures à celle de la lumière sont expliquées dans l'article précédent [3]. J'oserais même dire que l'effet photoélectrique, en même temps que les expériences d'interférence à grand angle, rendent nécessaire d'admettre une action se propageant à une vitesse supérieure à celle de la lumière. L'expérimentateur sans idée préconçue proclamerait certainement que ces deux expériences considérées ensemble établissent l'existence d'une telle action se propageant à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

2. La seconde objection à notre image de l'onde se concentrant est de nature philosophique. Cette dernière est cependant injustifiée à notre avis.

On prétend que nous devons considérer le rayonnement comme constitué soit d'ondes soit de corpuscules et que nous ne devons pas mêler ces images. L'argument pour ne pas admettre une telle image composite est liée à la relation d'incertitude de Heisenberg. On indique que nous ne pouvons obtenir de connaissance expérimentale directe de la distribution d'intensité à l'intérieur d'une onde ou même de son extension spatiale lorsque nous tentons de montrer que la même onde est capable d'interférer.

Prenons comme exemple l'expérience de Selényi. Supposons qu'une source ponctuelle de lumière émette des photons l'un après

---

3. « Sur l'interprétation physique de la transformation de Lorentz », *Acta Physica Hungarica*, t. I, fasc. 4, 1952, pp. 391-422. (N.d.T.)

l'autre, avec des intervalles suffisamment longs pour rendre toute interaction entre photons individuels impossible. Si nous entourons la source avec des photomultiplicateurs disposés sur la surface d'une sphère centrée sur la source, les photons actionneront les photomultiplicateurs et, statistiquement, nous pouvons déterminer la distribution d'intensité. Si la source est telle que la lumière soit polarisée parallèlement à l'axe z nous trouvons que le nombre relatif de photons contenus dans un angle solide $d\Omega$ autour d'une direction faisant l'angle θ avec l'axe des z est proportionnel à $sin^2\,\theta$.

A partir de cette expérience, nous pouvons ainsi établir la distribution statistique de la direction des photons — mais nous ne pouvons établir qu'un quelconque de ces photons possède une extension spatiale et qu'en vertu de cette extension chacun d'eux aurait pu être amené à interférer avec lui-même. D'autre part, retirant les photomultiplicateurs, nous pouvons, comme le fit réellement Selényi, amener au moyen de réflexions les parties divergentes de chaque onde sphérique à interférer et à produire à une certaine distance la figure d'interférence.

Nous pouvons ainsi établir par ces expériences avec une série de photons que le rayonnement est émis dans toutes les directions : nous ne pouvons cependant rechercher si les photons individuels auraient pu ou non donner lieu à interférence s'ils n'avaient pas été absorbés. Considérant une autre série de photons, nous pouvons leur permettre de former une figure d'interférence, mais nous ne pouvons savoir pour ces derniers photons s'ils avaient été émis ou non suivant une distribution sphérique.

La conclusion positiviste de tout cela est que, comme nous ne pouvons démontrer avec la *même* série de photons à la fois la distribution sphérique et la capacité d'interférer, on prétend qu'il est « dépourvu de sens » de conclure que ces deux propriétés existent simultanément. Cette vue positiviste est, cependant, tout à fait injustifiée; nous pouvons en toute sécurité nous appuyer sur nos mesures effectuées sur deux séries séparées de photons et conclure que les propriétés établies au moyen des deux expériences sont des propriétés réelles de chaque photon individuel.

§ 7. Afin de démontrer notre assertion tout à fait clairement, supposons que nous avons un dispositif que nous puissions aisément modifier de façon à entourer la source de lumière de photomultiplicateurs ou à obtenir le dispositif d'interférence. Ainsi les 1er

3e, 5e... photons émis serviront à établir la distribution angulaire de la lumière émise, les 2e, 4e, 6e... photons à produire une figure d'interférence. Il est maintenant clair que nous aurions pu utiliser les photons n°s 2, 4, 6... pour la première sorte d'expérience et les photons n°s 1, 3, 5... pour la seconde et que cela n'aurait rien changé au résultat. De plus, il est clair qu'après avoir effectué un grand nombre d'expériences des deux espèces nous pouvons sans risque considérer les deux sortes de propriétés établies ainsi pour un grand nombre de photons comme étant des propriétés de *tous* les photons émis dans des conditions similaires.

Cette sorte de conclusion est en fait le type de généralisation qu'on a à faire à chaque pas lorsqu'on bâtit une théorie à partir de résultats expérimentaux. L'école de Bohr insiste généralement beaucoup sur le fait que nous n'ayions pas eu la possibilité matérielle de faire les deux sortes d'expériences sur le même photon, mais seulement sur deux photons différents. Cependant, à notre avis, cela n'est pas vraiment un fait important, comme on peut le voir d'après l'exemple suivant.

Nous considérons cent obus chargés. Nous les examinons l'un après l'autre. Nous examinons le premier obus en l'ouvrant, en retirant l'explosif et en l'analysant chimiquement. Le second, nous ne l'ouvrons pas, mais nous le faisons exploser. Le troisième, nous l'ouvrons à nouveau, le suivant, nous le faisons exploser et ainsi de suite. Il serait ridicule de conclure, après en avoir fini avec tous les obus, que cinquante d'entre eux contenaient un explosif d'une certaine composition (établie par analyse), mais que nous ne savons pas si ces obus auraient pu exploser. Dans une terminologie rappelant celle utilisée à propos des relations d'incertitude nous devrions dire qu'un obus *ou bien* contient de l'explosif *ou bien* peut exploser. En fait il y a une « relation d'incertitude » liée au fait qu'en s'assurant par analyse chimique du contenu d'un obus nous le rendons incapable d'exploser, ou qu'en faisant exploser l'obus nous rendons l'analyse chimique impossible. Quoique cette réciprocité soit jusqu'ici correcte, nous ne supposons pas cependant que nous créons le composé chimique en l'analysant, mais nous sommes absolument convaincus que si nous trouvons ce composé dans un grand nombre d'obus, il se trouve aussi bien dans la plupart des autres, quoique nous n'ayions pas pris la peine d'effectuer l'analyse du contenu de ces obus restants. Ainsi, par induction, nous généralisons nos résultats obtenus sur un échantillonnage suffisamment im-

portant et nous supposons naturellement que ces résultats peuvent être étendus aux cas non compris dans l'échantillonnage. Ainsi, analysant chimiquement les contenus d'un échantillonnage et faisant exploser les obus d'un autre lot, nous concluons que dans le reste (que nous n'avons pas examiné du tout) chaque obus contient de l'explosif d'une certaine composition chimique et peut aussi exploser.

Revenant à l'exemple des photons, nous sommes tout à fait convaincus que chaque photon commence son voyage comme front d'onde étendu et nous sommes convaincus, à partir de notre expérience sur l'effet photoélectrique, que la totalité de ce front d'onde étendu peut être absorbé par un petit obstacle placé sur le trajet du front d'onde.

§ 8. Revenant à la première objection contre notre image d'ondes se concentrant, nous voudrions noter ce qui suit.

Rejetant les objections positivistes, nous sommes conduits directement, à partir des faits expérimentaux décrits au paragraphe 5, à l'image d'une onde se concentrant. Ainsi l'analyse sans préjugé de l'expérience conduit à une action se déplaçant avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. On ne peut arguer que cette analyse doit être rejetée parce qu'elle contredit la théorie de la relativité bien établie expérimentalement. Cette théorie, dans sa formulation habituelle, affirme simplement que l'interprétation d'Einstein de la transformation de Lorentz serait invalidée si l'existence d'une action se propageant avec une vitesse supérieure à celle de la lumière était découverte. Les résultats physiques, établis expérimentalement, de la théorie de la relativité sont, cependant, fondés mathématiquement sur la transformation de Lorentz et sont en grande partie indépendants du fait que l'on interprète cette transformation à la manière d'Einstein ou à la manière de Lorentz et Fitzgerald. L'hypothèse de la constriction du photon est ainsi incompatible avec l'interprétation einsteinienne de la transformation de Lorentz, mais est compatible avec tous les résultats physiques (qu'il faut distinguer des résultats spéculatifs) déduits de la théorie de la relativité.

Le désaccord entre l'hypothèse de la constriction et la théorie d'Einstein se présente de la manière suivante. La constriction du photon doit être considérée comme une perturbation de l'onde électromagnétique partant du centre absorbant et s'étendant avec une vitesse supérieure à celle de la lumière aux autres parties de l'onde

Ainsi, l'interaction entre l'onde et le centre absorbant est la *cause* de la constriction, la constriction étant l'effet. Ce processus, vu par un observateur se déplaçant suffisamment rapidement, apparaîtrait différemment, pourvu que l'observateur ait ajusté ses horloges et ses règles conformément aux prescriptions de la théorie de la relativité. Cet observateur trouverait que la perturbation est partie d'une région située quelque part à la périphérie de l'onde et s'est étendue vers le centre de perturbation. Cette dernière image échange cause et effet et est naturellement inacceptable.

Ainsi, si nous maintenons que la constriction de l'onde est *causée* par le centre perturbateur, nous devons rejeter comme incorrect le point de vue de l'observateur se déplaçant rapidement. Cela signifie que ce système de l'observateur rapide doit être considéré comme étant *réellement* distordu au sens de l'article précédent.

4. L'interprétation de la fonction d'onde de Schrödinger

§ 9. Les considérations sur les photons peuvent être étendues aux problèmes relatifs aux électrons ou aux autres particules élémentaires. Dans cette voie, la question se pose de la signification précise des fonctions d'onde. Trois versions ont été considérées.

1. La fonction ψ dans la conception originale de Schrödinger représente un électron étalé. Ainsi $|\psi|^2 \, dV$ est la matière réellement contenue dans l'élément dV. Cette image très séduisante a dû être abandonnée puisqu'elle ne pouvait être étendue aux systèmes de plusieurs électrons.

2. L'interprétation de Born. $|\psi|^2$ est la probabilité de trouver l'électron dans l'élément dV. C'est un cas particulier de l'hypothèse plus générale suivante :

Supposons que O soit un opérateur correspondant à la mesure d'une certaine grandeur physique. Les fonctions propres de cet opérateur peuvent s'écrire ψ_1, ψ_2, ... les valeurs propres correspondantes O_1, O_2, ... L'état ψ d'un système peut être développé par rapport aux fonctions propres

$$\psi = A_1\psi_1 + A_2\psi_2 + \ldots.$$

La signification de A_k est que, si l'on effectue une mesure, $|A_k|^2$ est la probabilité d'obtenir comme résultat O_k.

Les considérations idéalistes suivantes sont généralement ajoutées à l'hypothèse de Born :

Si en effectuant la mesure nous trouvons que la grandeur physique O a la valeur O_k, notre connaissance de l'état du système est modifiée par cette mesure et par conséquent la fonction d'onde a changé. Pour commencer nous avons attribué au système une probabilité $|A_k|^2$ pour que la grandeur O ait la valeur O_k; après la mesure nous savons de manière certaine que O a cette valeur. L'état pour lequel le système possède certainement la valeur O_k est exprimé par la fonction d'onde ψ_k. Ainsi on suppose que la *mesure* entraîne un brusque changement d'état

$$\psi \rightarrow \psi_k.$$

C'est l'essence de « l'influence » si souvent évoquée « de l'observateur sur le système ». Nous reviendrons plus loin sur cette conception dont nous donnerons une critique détaillée.

3. Le troisième mode d'interprétation de la fonction d'onde est l'interprétation statistique, la probabilité étant utilisée de manière objective. On déclare ainsi que si l'on a plusieurs atomes, chacun dans l'état ψ, et que l'on effectue la même mesure sur chacun d'eux, les résultats sont dispersés. La probabilité de trouver une valeur particulière O_k sera $|A_k|^2$. Ainsi, si on effectue N mesures, environ $|A_k|^2N$ conduiront à la valeur O_k.

§ 10. *Analyse des trois interprétations*. Le troisième point de vue, accepté par de nombreux physiciens, est certainement correc dans les limites mêmes qui en résultent. Je m'efforce de montre qu'il ne contient pas la totalité des phénomènes auxquels nous pou vons accéder. Les insuffisances de l'hypothèse 3 peuvent être dé montrées par exemple au moyen de l'interprétation du phénomèn d'interférence par deux fentes (voir § 3, *fig.* 1).

Considérons des particules venant de la gauche et tombant s les deux fentes. En plaçant des compteurs en arrière des fentes, d façon à ce qu'ils couvrent complètement celles-ci, nous pouvons l'aide de compteurs déterminer pour chaque particule si elle frapp la fente A ou la fente B. Naturellement, beaucoup de particules tomberont sur aucune des deux fentes et seront absorbées p l'écran; mais nous sommes intéressés seulement par celles qui écha pent à l'absorption par cet écran I.

Les particules localisées, lorsqu'elles tentent de pénétrer da

une des fentes, sont absorbées au cours de ce processus de localisation, et ainsi elles n'atteindront jamais l'écran II. Si nous retirons les compteurs des fentes les particules tombant sur ces dernières atteindront l'écran II et formeront statistiquement une figure d'interférence.

N'ayant pas de préjugés positivistes, nous supposons que les particules qui n'étaient pas localisées par les compteurs, mais pouvaient passer et ainsi donner naissance à la figure d'interférence, ***auraient pu être localisées*** sur leur chemin passant à travers la fente *A* ou la fente *B*. Si, à partir de cette affirmation parfaitement correcte, nous concluons que chaque particule a passé à travers *une fente seulement* et s'est ensuite dirigée vers l'écran II, nous sommes conduits à de graves difficultés. Ces difficultés deviennent tout à fait évidentes si nous considérons l'intensité au voisinage d'un minimum de la figure d'interférence. Si nous considérons les particules passant à travers *A*, nous trouvons qu'elles évitent de tomber sur II près du minimum. Si maintenant nous fermons la fente *B* les particules passant par *A* n'évitent plus cette région. Ainsi, il doit y avoir des particules passant au travers de *A* et qui sont redirigées du voisinage d'un maximum vers celui d'un minimum par la fermeture de la fente *B*. Nous ne pouvons déterminer précisément quelles particules sont ainsi influencées, mais comme l'intensité est étalée du voisinage du maximum sur toute la surface de la figure d'interférence comme résultat direct de la fermeture de la fente *B*, il doit exister des particules individuelles qui, bien qu'ayant traversé la fente *A*, sont influencées par l'état d'ouverture ou de fermeture de la fente *B*.

§ 11. On pourrait rendre compte de ce résultat étrange si nous supposions que les particules passant par la fente *A* peuvent interagir avec celles passant à travers *B*. Cependant, une telle interaction peut être éliminée en obligeant les particules individuelles à arriver l'une après l'autre, deux particules consécutives étant séparées par de longs intervalles de temps, de manière que le sort de chaque particule soit complètement fixé avant que la particule suivante arrive. Ainsi le phénomène d'interférence ne peut être interprété au moyen de l'interaction mutuelle des électrons individuels.

Si nous admettons que les particules sont indépendantes l'une de l'autre, alors nous devons admettre que l'expérience d'interférence prouve de manière concluante que *chaque particule a dû traverser à la fois les deux fentes A et B*. Si un certain nombre de

particules était passé par A seulement et le reste seulement par B, ces deux séries de particules étant indépendantes l'une de l'autre, auraient donné sur l'écran une distribution

$$f_{A+B} = f_A + f_B$$

où f_A est la distribution des particules passant par A seulement et non influencées par B et de même f_B la distribution des particules passant par B et non influencées par A. En fait nous trouvons que, près du minimum,

$$f_{A+B} < f_A + f_B$$

et, près du maximum,

$$f_{A+B} > f_A + f_B .$$

Ainsi, les deux fentes ont une influence sur les particules individuelles parvenant entre les deux écrans.

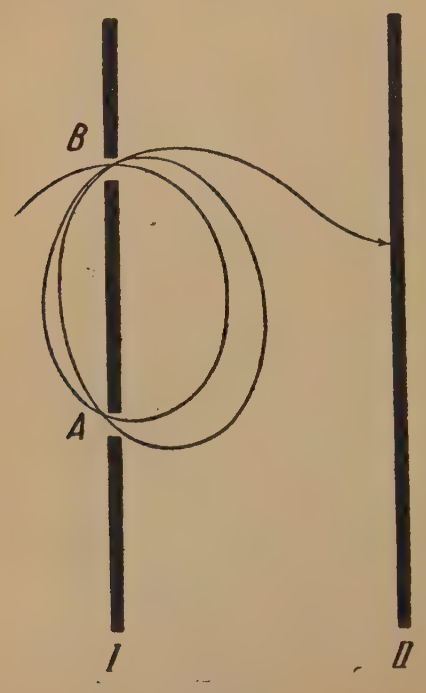


Fig. 4

On peut imaginer deux moyens d'expliquer comment les deux fentes sont capables d'influer sur les particules individuelles.

Primo : on peut supposer que chaque particule est animée d'un mouvement très violent et compliqué de telle sorte qu'elle traverse les deux fentes plusieurs fois avant de frapper l'écran II et d'être absorbée (voir *fig.* 4). Acceptant cette hypothèse pour le moment, nous nous attendons à ce que, si nous plaçons des compteurs derrière les deux fentes, une particule soit absorbée à sa première tentative de pénétrer en *A* ou *B*. Si, d'autre part, nous laissons les deux fentes ouvertes, la particule circule sur une trajectoire compliquée qui est affectée par la position des deux fentes, le mouvement se terminant lorsque la particule frappe l'un des deux écrans et est absorbée.

L'image ci-dessus semble, cependant, tout à fait fantastique; une des grandes difficultés qu'elle présente est que l'écran I devrait absorber la particule à la première rencontre. Or il est difficile d'imaginer que les particules puissent traverser plusieurs fois de suite les fentes étroites sans tomber sur la surface absorbante beaucoup plus grande de l'écran I. Ainsi, l'image ci-dessus ne semble pas mériter d'être prise en considération.

Secundo : on suppose, d'une manière assez semblable à l'hypothèse originale de Schrödinger, que chaque particule est en réalité un paquet d'ondes étendu. L'onde, venant de la gauche, tombe sur les deux fentes et interfère à droite de I. Lorsqu'elle est absorbée, l'onde totale se contracte en une petite région entourant le centre absorbant.

Cette dernière image est analogue à celle proposée pour le photon, elle nous permet d'interpréter l'ensemble de la situation. Considérons une particule, le front d'onde correspondant tombe sur I. Si les fentes *A* et *B* sont ouvertes, l'onde, pourvu qu'elle n'ait pas été absorbée par I, passe à travers les deux fentes, les deux parties interfèrent et, éventuellement, la totalité est absorbée en un point de II. Les probabilités d'absorption dans les différentes régions de II sont proportionnelles à $|\psi|^2$.

De cette manière nous comprenons les résultats expérimentaux obtenus avec les deux dispositifs considérés auparavant : primo, le dispositif dans lequel les fentes sont couvertes par des compteurs et secundo le dispositif avec les fentes ouvertes et des indicateurs signalant l'impact des particules sur l'écran II. Dans le premier dispositif, l'onde tombe sur les deux compteurs, mais est absorbée

par l'un d'eux. Les relations de phase, etc., déterminent lequel des deux compteurs absorbe la particule; statistiquement ils ont tous deux la même probabilité de l'absorber si les fentes sont semblables.

Si on laisse les fentes ouvertes, l'onde se contracte seulement après le contact avec l'écran II (à moins, naturellement, qu'elle n'ait été absorbée par l'écran I hors de la surface des fentes).

La constriction a lieu de préférence près d'un maximum d'interférence.

§ 12. Dirac [14], dans son livre *Principles of Quantum Mechanics* (p. 8), fait le raisonnement suivant sur un problème similaire : « Pour qu'un photon soit dans un état de translation défini il n'est pas nécessaire qu'il soit associé à un seul faisceau lumineux, il peut être associé à deux faisceaux ou plus, qui sont les composantes entre lesquelles a été divisé le faisceau initial »... « Considérons maintenant ce qui arrive quand nous déterminons l'énergie dans un des faisceaux composants. Le résultat d'une telle détermination peut être soit le photon entier, soit rien du tout. Ainsi, le photon doit passer brusquement d'une situation dans laquelle il se trouve partiellement dans l'un des faisceaux et partiellement dans l'autre à une situation où il est entièrement dans l'un d'eux. Ce changement soudain est dû à la perturbation de l'état de translation qui est nécessairement introduite par l'observation ».

Le raisonnement ci-dessus est tout à fait analogue à notre affirmation d'une constriction de la fonction d'onde; pourtant, un sens différent est donné à cette constriction.

Voici une seconde citation du livre de Dirac (p. 9), qui nous semble intéressante en liaison avec le problème du comportement des particules individuelles. « Quelque temps avant la découverte de la mécanique quantique, on réalisa que la liaison entre ondes lumineuses et photons devait être de caractère statistique. Ce qu'on ne réalisait pas, cependant, c'est que la fonction d'onde donne une information sur la probabilité pour qu'un photon soit en un lieu particulier et non pas le nombre probable de photons en ce lieu. L'importance de la distinction peut être rendue claire de la manière suivante. Supposons que nous ayions un faisceau de lumière constitué d'un grand nombre de photons partagé en deux composantes d'égale intensité. Dans l'hypothèse où l'intensité d'un faisceau est liée au nombre probable de photons qu'il contient, nous devrions

avoir la moitié du nombre total de photons dans chaque composante. Si les deux composantes sont maintenant amenées à interférer nous devrions admettre qu'un photon d'une des composantes peut interférer avec un photon de l'autre. Quelquefois ces deux photons devraient s'annihiler l'un l'autre et d'autres fois ils devraient produire quatre photons. Cela serait en contradiction avec la conservation de l'énergie [4]. La nouvelle théorie, qui relie la fonction d'onde aux probabilités pour un photon, surmonte la difficulté en faisant aller chaque photon partiellement dans chacune des deux composantes. Chaque photon interfère alors avec lui-même. Il n'y a jamais d'interférence entre deux photons différents. L'association de particules avec des ondes discutée ci-dessus n'est pas restreinte au cas de la lumière, mais elle est, d'après la théorie moderne, d'application universelle ».

A partir de ces citations, qui représentent le point de vue admis en mécanique quantique, nous voyons qu'on doit supposer qu'un photon ou un électron rencontrant des obstacles s'étale en donnant un état superposé. La mesure cause une modification telle que l'état superposé est soudainement changé en un état simple de la manière $\psi \rightarrow \psi_k$. Ce changement brusque peut être nommé constriction, il peut représenter une constriction réelle dans l'espace, par exemple si un photon est absorbé ou un électron capturé par un atome, mais il peut représenter une « constriction dans l'espace de Hilbert » c'est-à-dire une transition d'un état complexe à un état simple.

La différence entre mon propre point de vue et le point de vue orthodoxe réside en ma conviction que cette constriction est un processus réel qui devrait être étudié et décrit ; le point de vue orthodoxe soutient que la constriction n'est pas un processus réel, mais seulement quelque chose qui se passe dans notre esprit.

Dirac évite soigneusement de définir la nature de la constriction, il déclare seulement que la constriction est quelque chose qui ne peut être représenté par un modèle, c'est-à-dire — d'après Dirac — par une image classique. La raison pour laquelle une telle description serait impossible n'est pas expliquée; cependant, il se peut qu'une description détaillée soit considérée comme impossible pour les raisons suivantes : 1. Une telle image nécessiterait une

4. Une telle hypothèse est aussi exclue par les expériences de Vavilov sur les fluctuations.

vitesse supérieure à celle de la lumière. 2. Cette image serait incompatible avec une théorie linéaire; ce dernier point sera discuté plus loin. Cependant, si nous n'excluons pas des vitesses supérieures à celle de la lumière et une théorie non linéaire, il semble ne rester aucun argument selon lequel il serait impossible de rendre compte des détails du processus de constriction, quoique mathématiquement la description détaillée de la constriction puisse représenter un problème redoutable.

Nous voyons ainsi que, d'après Dirac, en observant le photon nous le perturbons d'une manière telle que, par suite de cette perturbation causée par l'observation, il change son état, en partant d'un état où il est réparti sur plusieurs faisceaux pour arriver à un état où il est limité à un seul faisceau. L'école de Bohr interprète le phénomène de la manière suivante : le champ d'ondes décrit seulement notre connaissance du photon. Lorsque la trajectoire du photon a été divisée, nous ne savons pas si le photon est dans un faisceau ou dans l'autre. Cet « état de connaissance » est décrit par un champ d'ondes divisé entre deux faisceaux. Si l'observation permet de constater que le photon est réellement dans l'un des faisceaux, alors, comme résultat d'une telle observation, notre état de connaissance change, passant de l'incertitude sur le faisceau dans lequel se trouve le photon à la certitude que le photon est dans un faisceau déterminé. Ce changement soudain de connaissance est supposé être décrit par le changement soudain de la fonction d'onde.

La description ci-dessus, qui suppose que la fonction d'onde représente surtout notre connaissance du système, est cependant complètement artificielle et inadéquate. Comme nous avons essayé de le montrer sur de nombreux exemples, la fonction d'onde correspond à l'état réel du système et non à notre connaissance subjective de celui-ci ; donc, la fonction d'onde ne peut être affectée par ce qu'on peut arriver à connaître sur le système. Pour nous débarrasser du rôle mystique de l'observateur, sur lequel on a tant écrit, il est utile de décrire avec un peu plus de détails en quoi consiste une observation réelle. Quel est, par exemple, le processus qui d'après Dirac localise le photon ? En discutant ce qu'est une observation, il est essentiel de ne pas se satisfaire d'expériences idéales réalisées avec des microscopes à rayons γ, etc., mais d'analyser des expériences réelles qui peuvent être effectuées au laboratoire si on vous défie de le faire. Le mysticisme que l'on rencontre habituellement à propos du rôle et des effets de l'observation doit être dans

une large mesure attribué au fait qu'habituellement on ne discute pas de ces problèmes à propos d'expériences possibles et réalisables.

§ 13. Une caractéristique importante d'une expérience réelle est que la lecture ou l'observation finalement effectuée se réfère à un effet macroscopique. Si nous expérimentons sur un effet microscopique [5], nous devons utiliser un dispositif dans lequel l'événement microscopique déclenche une ou plusieurs « avalanches » qui amplifient l'effet microscopique en donnant un effet macroscopique. Quoique ceci soit presque banal, il peut être utile de décrire les types principaux de telles expériences.

1. — *Enregistrement de particules élémentaires par les plaques photographiques.* La particule élémentaire frappe un grain sensible dans l'émulsion. Un grain dans lequel un certain nombre (petit) d'ions sont produits peut être développé; ainsi, le processus microscopique de production de quelques ions fait naître une réaction en chaîne et un grain macroscopique est impressionné.

2. — *Observation à la chambre de Wilson.* Au moyen de collisions, des ions sont produits. Chaque ion est, dans des circonstances convenables, capable, peu après la détente dans la chambre, de collecter rapidement les molécules et ainsi de croître en se transformant en gouttelette macroscopique. Ainsi, la goutte macroscopique est engendrée par une avalanche déclenchée par un événement microscopique.

3. — *Compteurs fonctionnant par décharge dans un gaz.* La particule élémentaire microscopique ionise au moins une molécule de gaz à l'intérieur du compteur. (Dans un compteur fonctionnant normalement un ion est suffisant pour déclencher le compteur).

L'ion est accéléré par le champ électrique à l'intérieur du compteur et produit une avalanche d'autres ions. L'avalanche croît jusqu'à atteindre des dimensions macroscopiques et une perturbation électrique en résulte, qui peut être enregistrée par des moyens macroscopiques.

4. — *Photomultiplicateur.* Un photon entre en collision avec un atome et donne lieu à un photo-électron. (Cette collision peut se produire à l'intérieur ou à la surface d'une cathode). L'électron

5. Par microscopique il faut entendre généralement ici *à l'échelle corpusculaire :* un grain d'émulsion photographique (quelques microns) est considéré comme macroscopique. (*N.d.T.*)

est accéléré par un champ électrique extérieur et est amené à donner naissance à des électrons secondaires. Les électrons secondaires donnent chacun naissance à plusieurs tertiaires et, en environ dix générations, une avalanche électronique se développe, d'une intensité telle qu'elle peut être enregistrée par des moyens macroscopiques.

5. — *Observation de petits nombres de photons à l'œil nu.* Les expériences de fluctuations réalisées et décrites par Vavilov montrent que l'œil humain est sensible à de petits groupes de photons. Cette sensibilité se ramène aussi pour l'essentiel à des réactions en chaîne compliquées déclenchées par l'effet microscopique primaire.

Ce qu'il y a d'important dans le fait que l'événement microscopique ait déclenché un événement macroscopique, c'est que ce dernier possède un caractère définitif qui ne peut être raisonnablement mis en doute et qui ne peut être rendu dépendant d'un observateur.

Le déclenchement ou le non-déclenchement d'un compteur mécanique existe objectivement, indépendamment du fait qu'il y avait là quelqu'un ou non pour l'entendre. (Cela est banal pour le matérialiste, mais est néanmoins mis en doute par les ultrapositivistes). Mais la conclusion importante est la suivante : puisque le déclenchement du dispositif mécanique est une réalité objective, l'existence d'un atome qui a déclenché l'avalanche à la sortie est aussi une réalité objective.

Discutons cela en nous appuyant sur un montage expérimental qui, si besoin est, peut être construit. Considérons le dispositif représenté *fig.* 5. Il contient trois parties principales formées de tubes à décharge convenables. Le premier tube C_1 et le troisième tube C_2 enregistrent l'entrée d'un électron dans le dispositif et la sortie d'un électron du dispositif. Le tube du milieu est divisé (électriquement) en un certain nombre de sections. Une série d'amplificateurs enregistrent dans lesquels de ces compartiments l'électron de passage a éventuellement donné lieu à la création d'au moins un ion. Un tel tube à décharge est de type courant et peut être construit au laboratoire. Le dispositif est supposé enregistrer l'ionisation créée par des électrons individuels le traversant.

Les amplificateurs sont déclenchés par des décharges électroniques, qui à leur tour sont causées par les ions qui peuvent être créés sur la trace d'un primaire. La décharge se développe seulement s

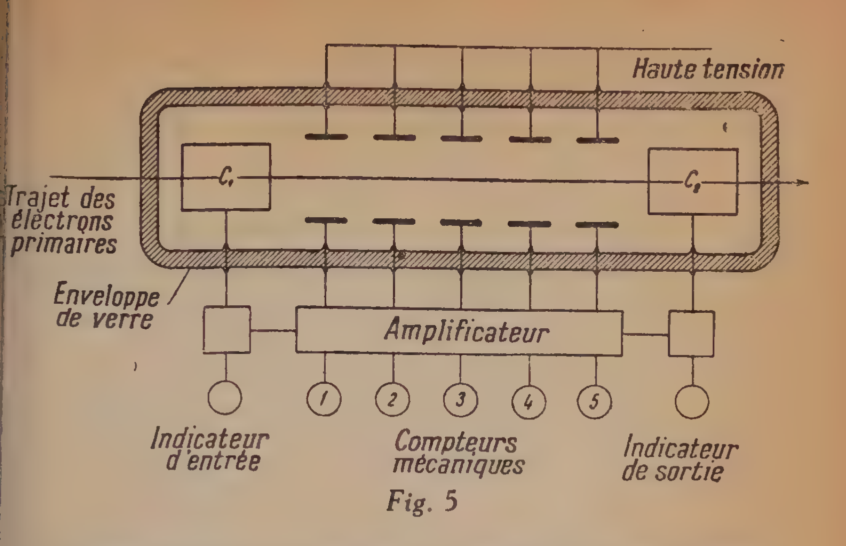


Fig. 5

un champ électrique est appliqué qui accélère les ions présents.

La localisation des ions ne doit pas nécessairement être effectuée immédiatement après le passage du primaire. Nous pouvons établir le champ collecteur quelque temps après le passage du primaire et déterminer un peu plus tard l'endroit où les ions ont été produits. Dans le cas d'une observation différée nous devons prévenir la diffusion des ions trop loin de leur point de formation, par exemple en appliquant un champ magnétique convenable.

Supposons, pour fixer les idées, que le compartiment du milieu se compose de cinq sections ; un enregistrement type pourra être représenté par l'écriture symbolique :

$$O \times O\ O \times$$

où O signifie : pas d'ions et x : au moins un ion. L'enregistrement ci-dessus montre ainsi qu'un ion au moins a été créé dans la seconde et dans la cinquième section de la chambre du milieu.

Enregistrant beaucoup d'électrons l'un après l'autre, nous pouvons établir qu'en moyenne la formation d'ions dans les cinq compartiments se produit avec certaines fréquences p_1, p_2, ... p_5. Ces quantités peuvent être considérées comme les probabilités de collisions ionisantes dans les cinq sections.

§ 14. Considérons la manière dont ce processus est décrit par la théorie quantique. L'électron incident peut être représenté par

un paquet d'ondes. Il doit occuper plusieurs longueurs d'onde de De Broglie, mais sa longueur est cependant faible, puisque les instants d'entrée et de sortie du tube se suivent de près. Les atomes dans le gaz rare à l'intérieur du tube sont des centres perturbateurs; ils peuvent être introduits sous forme de perturbations dans l'équation de la particule libre. Comme état initial nous avons ainsi un état qui comprend des atomes neutres et un électron sous forme d'un paquet d'ondes. Dans l'état final nous avons une fonction d'onde qui résulte de la superposition de l'état initial et d'un grand nombre d'états dans lesquels un ou plusieurs atomes de gaz sont des états ionisés (ou excités). Ainsi, comme résultat du passage du primaire, un état est formé dans lequel chaque atome est affecté et ionisé avec une certaine probabilité, qui est petite.

Ainsi la fonction d'onde décrivant l'état final a à peu près la forme suivante :

$$\psi = \Sigma A_k \psi_k$$

où $\psi_k = \psi\,(k_1, k_2, \ldots, k_N)$ est la fonction d'onde décrivant l'état dans lequel les atomes $k_1, k_2, \ldots, k_N$ sont ionisés. D'après la théorie quantique, une mesure est supposée introduire une perturbation telle qu'elle change la fonction d'onde ψ représentant cette superposition d'états ψ_k en une fonction simple représentant un état dans lequel il y a un nombre déterminé d'atomes ionisés dans chaque section du tube, les autres atomes étant restés neutres.

Ainsi nous nous attendons à ce que la mesure amène le changement $\psi \to \psi_k$. Mais quelle est la mesure qui cause la transition $\psi \to \psi_k$? L'établissement du champ collecteur ne peut être rendu responsable de cette transition. En effet, en établissant le champ nous provoquons le collectage des ions et le déclenchement des avalanches électroniques qui provoqueront ultérieurement le déclenchement de certains numérateurs. Mais il est clair que l'établissement du champ collecteur n'est pas en lui-même responsable de la transition $\psi \to \psi_k$. Le champ collecteur est, du point de vue de la mécanique ondulatoire, simplement une autre perturbation dépendant du temps, appliquée à l'équation de Schrödinger, et il cause le mouvement de tout atome du gaz dans la mesure où ce dernier est ionisé. Ainsi chaque atome commence à se déplacer avec une certaine probabilité et commence à produire des ions secondaires qui sont maintenant doublement hypothétiques, puisqu'ils doivent être considérés comme le résultat probable d'une collision qui se produit

seulement si la particule bombardante était d'abord ionisée. L'état ψ contient des ions qui subissent les collisions seulement comme étant probablement ionisés — et aussi longtemps qu'un atome n'est pas ionisé il n'est pas mis en mouvement par le champ électrique.

Il résulte de tout ceci qu'un nombre immense d'avalanches d'électrons probables se produisent ; celles-ci déclenchent avec certaines probabilités des combinaisons variées des numérateurs mécaniques ; mais, de quelque façon, la brume hypothétique vient à se dissiper, et finalement une série de compteurs déterminée est déclenchée.

Les ultra-positivistes disent que l'ensemble de l'amplificateur et des numérateurs mécaniques peut être considéré comme une partie du système quantique qui a comme état final une superposition de fonctions d'onde donc chacune se réfère à certaines combinaisons de numérateurs déclenchés. De ce point de vue extrême, les compteurs sont, dans cet état final, déclenchés seulement avec certaines probabilités et ils « se décident » à être déclenchés ou non au moment où Sa Seigneurie l'observateur se prépare à les regarder.

Ce point de vue est naturellement un fantastique non-sens. Cependant, on doit répondre à la question : à quel stade l'état pur émerge-t-il de l'état mélangé initial et comment en émerge-t-il ? Il est tout à fait certain que les numérateurs sont déclenchés de manière définie, indépendante de tout observateur et qu'à un certain stade avant qu'elle provoque le déclenchement des compteurs, la configuration a déjà été fixée.

Il serait plus simple de supposer que, dès le début, le primaire doit ioniser seulement des ions particuliers et que la fonction d'onde complexe décrivant les différents états possibles se réfère à la moyenne statistique seulement. Cette dernière hypothèse est pourtant incorrecte parce qu'elle néglige le fait, établi expérimentalement, de l'interférence d'états coexistant simultanément; l'interférence donne en fait la différence essentielle entre la mécanique quantique et l'ancienne théorie classique et on ne peut se dispenser d'en tenir compte.

§ 15. Ainsi, dans une description complète du phénomène, il est essentiel de supposer qu'au stade microscopique du processus se produisent des états superposés; mais ces états ne peuvent être réellement stationnaires. Afin de tenir compte du désaccord entre les

effets d'interférence qui prouvent la coexistence d'états stationnaires et du fait que les observations du type décrit plus haut conduisent à des résultats définis, on doit supposer que nous avons à modifier dans une certaine mesure le formalisme admis de la théorie quantique. Une hypothèse doit être formulée pour expliquer que les états superposés peuvent coexister pendant un certain temps — mais que de telles superpositions ne sont pas strictement stationnaires; on doit supposer qu'après un temps suffisant certains états superposés se changent graduellement en état simples.

Nous démontrons la nécessité de cette dernière hypothèse sur un second exemple traitant de l'expérience réelle suivante. Un primaire traverse une chambre remplie d'un gaz à basse pression; la pression est si faible que le primaire subit en moyenne une collision au cours de son passage. L'effet de cette collision (ou de ces collisions) est d'exciter quelques-uns des atomes. Après le passage du primaire les atomes excités émettront un photon, chaque photon ayant une fréquence déterminée. Supposons que la lumière soit collectée et envoyée sur un réseau et que, derrière le réseau, des photomultiplicateurs soient disposés de telle manière que chacune des cathodes couvre les positions d'une raie spectrale possible. Après le passage d'un primaire, il arrivera occasionnellement que l'un (ou parfois davantage) des photomultiplicateurs produise des signaux montrant que, comme résultat du passage du primaire, certains atomes sont excités dans des états définis et que ces atomes excités ont ensuite émis des photons avec des fréquences correspondant à leur état d'excitation.

La description quantique orthodoxe de ce processus serait (par analogie avec le cas précédemment décrit) la suivante : la particule primaire est représentée par un paquet d'ondes et les atomes du gaz par les fonctions d'onde usuelles correspondant aux atomes dans l'état fondamental. Par l'effet de l'interaction entre le primaire et les atomes du gaz, la fonction d'onde se change en une autre fonction dans laquelle chaque atome est représenté comme une superposition de la fonction d'onde correspondant à son état fondamental et de celles relatives à ses états excités. La fonction d'onde change encore ensuite par l'effet de l'émission spontanée de photons, les états atomiques excités meurent et à la fin nous obtenons une fonction d'onde qui est la superposition de nombreuses composantes, chaque composante contenant un nombre spécifié de photons. Mais si nous prenons la superposition au sérieux, ces photons existent

simultanément, mais à chacun d'eux est attribuée une amplitude de probabilité très inférieure à un.

L'observation est maintenant supposée perturber cette superposition compliquée d'états pour la réduire à un état simple où les photons fantômes disparaissent et où des photons réels existant avec une probabilité de 100 % apparaissent.

Juste comme dans l'exemple précédent, il est difficile de voir quelle est précisément cette observation qui a l'effet magique de clarifier l'état compliqué et qui le transforme en état simple. Si, dans notre exemple, nous plaçons les photomultiplicateurs suffisamment loin du réseau, nous pouvons différer considérablement la dernière étape de l'observation. Ainsi, tant que nous considérons le déclenchement du photomultiplicateur comme l' « observation réelle » nous pouvons nous arranger pour que cette action se produise bien après que la collision réelle ait pris fin. Il ne semble pas probable que l'état superposé persiste pendant un temps particulièrement long justement parce que nous avons choisi de placer les photomultiplicateurs loin du réseau. Il semble naturel de supposer qu'en réalité ce n'est pas l' « observation » qui entraîne la formation d'un état défini mais plutôt que l'état compliqué dû aux superpositions a une tendance interne à se simplifier lui-même. Ainsi, par exemple, un état qui contient deux photons chacun avec la probabilité un demi n'est pas en réalité stationnaire, mais un tel état, s'il est laissé seul se transformera graduellement en un autre état où le premier photon existe avec une probabilité 100 % et où l'autre a disparu.

5. Une tentative qualitative de modification de la mécanique ondulatoire.

§ 16. Dans les sections précédentes nous avons décrit et analysé des expériences sur des photons individuels et des particules élémentaires individuelles enregistrés par des dispositifs de comptage variés. Les résultats expérimentaux de Vavilov, qui utilisait de faibles intensités lumineuses de façon à ce que les effets des photons individuels deviennent apparents grâce aux fluctuations, sont également importants pour notre analyse du comportement des photons individuels. Les expériences considérées sont des expériences réelles, c'est-à-dire des expériences qui ou bien ont été réellement effec-

tuées ou bien auraient pu l'être avec un équipement expérimental standard.

Notre but est d'analyser ces résultats expérimentaux sans préjugé. Nous essayons ainsi de voir quelle interprétation de ces résultats expérimentaux aurait donnée un physicien classique ne connaissant rien des postulats de la théorie quantique. Un tel physicien aurait-il senti qu'il devait renoncer à interpréter ces résultats au moyen d'images classiques ou — n'étant pas entravé par des préjugés — aurait-il construit un modèle décrivant les électrons et les photons ?

A mon avis un tel physicien aurait en fait construit une image classique. Le fait que le développement réel de la physique n'a pas conduit à une image mais s'est poursuivi dans une autre direction, consistant à affirmer qu'une telle image est impossible, peut avoir deux raisons. Primo, les expériences dont nous disposons nous permettent maintenant de laisser échapper simultanément de nombreux phénomènes qui ont été éclaircis graduellement, un par un. Secundo, et cela peut être la raison la plus importante, quelques-unes des nouvelles idées de la relativité et de la théorie quantique étaient si fortement en harmonie avec l'idéologie bourgeoise que ces idées ont reçu un soutien inhabituel de la part de la société bourgeoise, et cet important soutien rend plus difficile l'éclaircissement de la situation. Quelques-uns des physiciens qui ont des conceptions plus larges ont vu effectivement les difficultés inhérentes aux idées modernes, comme le montrent par exemple les citations de Planck jointes à cet article.

Nous essayons maintenant d'esquisser qualitativement une telle image classique pour les phénomènes quantiques. Cette esquisse est seulement qualitative car je suis incapable de donner une théorie complète [6]. A la fin de cette section, je discute cependant, comme illustration de ces considérations qualitatives, une modification de l'équation de Schrödinger dans un cas particulier ; cette illustration vise seulement à montrer que nos affirmations ne conduisent pas à des impossibilités mathématiques.

§ 17. L'image qualitative du comportement d'un photon ou d'une

6. Max Planck [9] a aussi proposé des modifications au formalisme quantique; les difficultés qui conduisirent Planck à ses considérations ont beaucoup de points communs avec les problèmes discutés ici.

particule élémentaire quelconque, que j'ai tirée des diverses considérations présentées dans cet article, est essentiellement la suivante.

Le photon dans l'espace libre s'étale en obéissant pour l'essentiel aux équations de Maxwell ; aussi, le photon est supposé avoir une structure étendue avec une densité proportionnelle à la densité énergétique du champ. Le comportement du photon n'est cependant pas complètement représenté par le champ de Maxwell, pour deux raisons. 1. Ce champ n'explique pas pourquoi une fréquence ν est toujours émise par quanta d'énergie $h\nu$. 2. Les équations de Maxwell n'expliquent pas pourquoi une onde étendue est absorbée tout entière en un point, toutes les fois qu'elle est absorbée.

Les équations de Maxwell rendent bien compte du comportement moyen d'un ensemble de nombreux photons ; cependant, des expériences sur les photons individuels sont à notre disposition et les résultats de ces expériences ne peuvent être interprétés, même approximativement, par les équations de Maxwell. Une théorie qui rend bien compte du comportement statistique des photons a son grand mérite, mais nous ne devons pas reculer devant la question de la théorie du comportement des photons individuels. La question du comportement des photons individuels est la plus importante — puisque les résultats statistiques obtenus sur le comportement des photons montrent que les photons n'interagissent pas l'un avec l'autre.

Vavilov a démontré qu'une tache noire dans une figure d'interférence n'est pas due à des photons s'éteignant l'un l'autre mais qu'une telle tache n'est accessible à aucun photon individuel. Ainsi chaque photon (indépendant des autres), après avoir passé à travers un réseau, est handicapé pour atteindre une région sombre. Ce handicap ne peut provenir que d'une interaction du photon avec la totalité du réseau. C'est donc un fait expérimentalement établi qu'un photon interagit avec la totalité du réseau et par conséquent la question du comportement individuel de photons individuels ne peut être évitée.

Quand nous considérons le résultat d'une expérience macroscopique usuelle, par exemple la figure d'interférence donnée par un réseau, nous sommes seulement intéressés par le comportement statistique des photons ; savoir quel photon particulier tombe sur une région donnée de la figure est de peu d'intérêt. Néanmoins, nous devons chercher quelles sont les propriétés des photons individuels

qui conduisent au comportement statistique bien connu d'un ensemble de photons.

La situation n'est pas sans similitude avec celle de la théorie cinétique des gaz. Lorsqu'on décrit les propriétés d'un volume gazeux il est sans intérêt de savoir ce qui arrive à chaque atome particulier. Néanmoins il est d'un intérêt équivalent de connaître les propriétés de l'atome individuel, ces propriétés conduisant au comportement statistique connu de la masse.

Dans le cas du photon, on affirme souvent que nous devons nous satisfaire d'une description statistique et qu'il ne sert à rien de rechercher le mécanisme interne des photons — parce qu'il est hors de notre pouvoir de le trouver. Cette affirmation nous semble être un préjugé qui s'est établi depuis plusieurs dizaines d'années et qui a empêché un développement plus naturel.

Pour atteindre le mécanisme d'un photon individuel on devrait tenter de formuler les équations non linéaires régissant le champ électromagnétique. Ces équations devraient être telles qu'en effectuant une moyenne sur les paramètres internes des photons [7] elles se réduisent aux équations de Maxwell, soit exactement soit avec une bonne approximation. La non-linéarité de ces équations, lorsqu'on les applique à un photon seulement, devrait rendre compte des effets quantiques : c'est-à-dire l'émission et l'absorption de quantités d'énergie $h\nu$. Comme on l'a vu à partir des discussions précédentes, un tel champ non-linéaire doit faire intervenir une action se propageant avec une vitesse supérieure à celle de la lumière.

L'électron. La différence entre les problèmes de l'électron et ceux du photon réside en ce que dans des processus à faible énergie il n'y a ni émission ni absorption d'électrons, alors qu'il y a émission et absorption de photons. Les problèmes sont cependant du même type. L'équation de Schrödinger fournit une excellente représentation d'un électron dans un état stationnaire, par exemple d'un électron sur une orbite stationnaire d'un atome d'hydrogène. De plus, l'équation de Schrödinger décrit correctement l'électron libre et les phénomènes d'interférence auxquels il peut donner lieu. Si nous identifiions l'électron et sa fonction d'onde, comme le proposait initialement Schrödinger (voir § 9, 1), nous pourrions rendre

7. Ces paramètres internes doivent contenir par exemple les conditions initiales; des photons pour lesquels les conditions initiales ne sont pas très différentes peuvent se comporter différemment sur un long parcours.

compte de nombreux phénomènes; toutefois, comme dans le cas du photon, une telle image de l'électron a ses limites.

Dans une expérience d'interférences électroniques, on doit supposer qu'une onde possédant une certaine extension spatiale tombe sur le réseau qui donnera lieu aux interférences. D'après l'équation de Schrödinger, l'onde est décomposée par le réseau en plusieurs parties se propageant le long des faisceaux correspondant aux tâches brillantes de la figure d'interférences. Chaque électron, après passage dans le réseau, n'est détecté (par capture ou en engendrant des ions) qu'au voisinage d'une seule tache. Comme l'électron n'apparaît que le long d'un seul trajet, on doit supposer qu'à un instant déterminé, l'onde étendue se concentre en un seul faisceau. Cette concentration peut être spontanée, mais elle pourrait être également due à l'interaction qui conduit à la détection de l'électron.

Quels que soient les détails du processus, une théorie complète devrait décrire cette constriction. Si une modification non-linéaire convenable de l'équation de Schrödinger devait décrire le mouvement réel d'un électron, contraction comprise, cette description devrait être telle qu'en moyennant sur les paramètres initiaux de l'électron, nous obtenions un comportement identique (exactement, ou du moins avec une bonne approximation) à celui prédit par l'équation de Schrödinger. Les paramètres initiaux, qui peuvent être éliminés par le processus de moyenne, joueraient un rôle dans la condition initiale de l'électron ; la valeur de ces paramètres déterminerait lequel des états finaux possibles l'électron atteint au cours de son mouvement.

§ 18. Nous énonçons donc la proposition que l'électron ou le photon possède une structure étendue. Lorsqu'il n'y a pas de perturbation importante, cette structure se meut d'après l'équation de Schrödinger ou les équations de Maxwell. Le mouvement précis de la structure est régi par des équations non linéaires. Les solutions de ces équations non linéaires s'écartent de celles des équations linéaires dans le cas de fortes interactions et pendant les processus de constriction, mais elles se réduisent, au moins avec une bonne approximation, à celles des équations de Schrödinger et de Maxwell respectivement lorsqu'on moyenne sur certains paramètres initiaux α.

Schématiquement, on peut dire que le mouvement d'un paquet d'ondes unique sera décrit par une fonction $a\ (\mathbf{r},\ t,\ \alpha)$ solution d'une équation non linéaire, par exemple :

$$S(a) = \frac{\partial a}{\partial t}, \tag{2}$$

bien que l'équation réelle ne doive pas nécessairement être du premier ordre par rapport au temps.

Pour obtenir le comportement statistique correct, nous postulons que la moyenne de $|a|^2$ prise sur certaines valeurs de α est égale à $|\psi|^2$:

$$|\psi(\mathbf{r},t)|^2 = \int |a(\mathbf{r},t,\alpha)|^2 d\alpha \tag{3}$$

où ψ obéit à l'équation de Schrödinger ordinaire. La relation (3) n'est pas nécessairement la connection exacte entre a et ψ, elle sert seulement à illustrer notre idée. L'intégration par rapport à α doit se faire sur certaines solutions spécifiées de (2) ; ces solutions peuvent à l'instant t = O être toutes assez semblables, mais elles se sépareront par la suite.

Les paramètres α ainsi introduits sont essentiellement les « paramètres cachés » dont Neumann a prouvé qu'ils n'existent pas en mécanique quantique. En dépit de la preuve de Neumann, nous disons que de tels paramètres existent. Neumann a seulement prouvé qu'il ne pouvait y avoir de paramètres cachés dans le cadre de la mécanique quantique. Ainsi, un système contenant des paramètres cachés ne saurait obéir exactement à la mécanique quantique. C'est pourquoi l'introduction de fonctions a (r, t, α) contenant le paramètre caché α devra conduire à des résultats différents, sur certains points, de ceux de la mécanique quantique habituelle. Une telle différence existe effectivement entre le modèle que nous proposons et la mécanique quantique habituelle. Cette différence va être expliquée à l'aide d'un exemple.

§ 19. Considérons à titre d'exemple le cas d'un électron qui se dirige vers une barrière de potentiel. D'après la mécanique quantique et, pour l'essentiel, en accord avec l'expérience, l'électron sera réfléchi ou transmis avec certaines probabilités.

Représentons un électron par un paquet d'ondes dont le mouvement sera régi par l'équation de Schrödinger. Tout en diffusant lentement, il se meut vers la barrière de potentiel. Lorsqu'il l'atteint, il se sépare en deux parties, dont l'une est réfléchie et l'autre pénètre la barrière et continue son parcours.

Cette séparation du paquet d'ondes est une décomposition réelle puisque les deux parties, réunies ensemble à nouveau, peuvent être amenées à interférer.

D'autre part, si nous localisons l'électron, en le laissant déclencher un dispositif de mesure, nous le trouverons entièrement dans l'un des deux paquets.

La théorie quantique affirme que la concentration de la particule en l'une des parties du paquet est provoquée par la mesure. Elle assure que le paquet demeure scindé en deux parties *jusqu'à ce que* la mesure commence et que la mesure détruit une moitié du paquet d'ondes et complète l'autre moitié. D'après la mécanique quantique, aussi longtemps que la mesure n'a pas été faite, les deux parties se meuvent dans des directions opposées et, au moins en principe, elles pourraient être amenées à interférer au bout d'un temps arbitrairement long après la collision qui a conduit à la séparation initiale du paquet d'ondes.

Bien qu'il soit clair que l'électron peut réellement être localisé dans l'un ou l'autre des faisceaux longtemps après la collision, il n'existe pas de preuve expérimentale que les deux faisceaux puissent encore interférer l'un avec l'autre longtemps après la collision.

L'affirmation de la théorie quantique selon laquelle les deux faisceaux restent indéfiniment cohérents n'a pas été vérifiée et semble très douteuse pour des raisons générales.

Nous ne serons en contradiction avec aucune expérience réalisée en supposant que, bien que le paquet d'ondes soit d'abord réellement décomposé par la collision, les deux parties néanmoins ne se meuvent pas indéfiniment dans des directions opposées. Il n'y a aucune preuve d'une séparation indéfinie des deux fractions, et nous pensons qu'il est beaucoup plus plausible d'admettre que cette séparation prend graduellement fin par un processus au cours duquel l'une des deux parties est aspirée graduellement par l'autre. Il est probable qu'au bout d'un temps suffisamment long, seule l'une des parties subsiste. Nous suggérons que lorsque l'électron a été concentré en l'un des deux faisceaux, il n'est plus possible de faire interférer les deux faisceaux. *Ainsi, il semble raisonnable de supposer que la fonction d'onde décrivant une particule qui se sépare en deux décrit d'abord la décomposition réelle de la particule ; mais graduellement, la particule prend une direction déterminée, après quoi la fonction d'onde de Schrödinger, qui, elle, reste décomposée, cesse de se rapporter au comportement d'une seule particule, mais*

commence à décrire le comportement statistique de beaucoup de particules.

Soit ψ_1 l'onde réfléchie et ψ_2 l'onde transmise. La fonction d'onde d'un électron après la collision est ainsi :

$$\psi = A\psi_1 + B\psi_2$$
$$|A|^2 + |B|^2 = 1.$$

Notre nouvelle hypothèse est que, pendant un temps assez court après la collision, $|\psi|^2$ représente la distribution spatiale réelle d'un électron. Ultérieurement, la distribution spatiale d'un électron est donnée par $|\psi_1|^2$ ou $|\psi_2|^2$, les probabilités respectives des deux distributions étant $|A|^2$ et $|B|^2$.

Le trait de la mécanique quantique qu'il n'est pas nécessaire de conserver, puisqu'il n'a pas été prouvé expérimentalement, est qu'un état superposé $\psi = A\psi_1 + B\psi_2$ (où ψ_1 et ψ_2 sont des paquets s'éloignant l'un de l'autre) représente *de façon permanente* l'état d'un électron. Je crois que cette fonction ψ décrit au début l'état d'une particule mais qu'ensuite, elle *dégénère* progressivement en la description de la superposition statistique des états possibles de la particule.

A l'aide des fonctions a ($\mathbf{r}$, t, α), ceci peut être exprimé de la manière suivante. Au temps t = O, il peut y avoir deux états initiaux peu différents l'un de l'autre, à savoir

$$a(\mathbf{r},0,\alpha_1) \approx a(\mathbf{r},0,\alpha_2) \approx \psi(\mathbf{r},0). \qquad (4)$$

Pour les grandes valeurs de t, ces deux états initiaux divergent en deux états essentiellement distincts, soit :

$$\left.\begin{aligned} a(\mathbf{r},t,\alpha_1) &\approx \psi_1(\mathbf{r},t) \\ a(\mathbf{r},t,\alpha_2) &\approx \psi_2(\mathbf{r},t) \end{aligned}\right\} \text{ pour } t \text{ grand.} \qquad (5)$$

La particule est ainsi réfléchie ou bien transmise; lequel de ces deux événements se réalise, cela dépend de la valeur de α. La fonction a avec une valeur fixée de α ne décrit qu'un seul de ces deux processus, cependant que la fonction ψ contient les deux possibilités avec leurs amplitudes de probabilité respectives. Les équations (4) et (5) sont en accord avec (3) puisque le terme croisé $\psi_1\psi_2^* + \psi_1^*\psi_2$ est négligeable à cause de l'empiètement négligeable de ψ_1 et ψ_2 une fois que les paquets sont séparés. Pour obtenir l'accord complet, nous devons supposer que les intégrales $\int d\alpha$ prises

sur des voisinages de α_1 et α_2 tels qu'ils déterminent des états finaux semblables, sont proportionnelles aux probabilités respectives de ces états, c'est-à-dire que nous devons exiger que

$$\int_{\alpha_1} da \sim |A|^2, \qquad \int_{\alpha_2} da \sim |B|^2. \qquad (6)$$

La différence entre les vues anciennes et les nôtres peut être résumée de la manière suivante :

Supposons qu'une particule soit décomposée par une barrière de potentiel.

Nous procédons à une observation longtemps après la collision. Cette observation pourrait être une expérience d'interférence dans laquelle les deux parties sont réunies, ou bien une expérience dans laquelle on localise la particule afin de déterminer dans lequel des deux faisceaux elle est contenue. Les deux expériences s'excluent mutuellement, mais nous pouvons réaliser l'une ou l'autre.

Selon les vues anciennes, la première expérience contraint la particule à révéler sa nature d'onde étendue, la seconde contraint la particule à apparaître comme un paquet d'ondes concentré. L'observateur est libre de réaliser l'une ou l'autre de ces expériences et, ainsi, c'est lui qui décide de ce qui va advenir du paquet d'ondes. Puisque de cette façon l'observateur influence de façon essentielle ce qui va advenir à la particule, le destin de celle-ci ne peut être prédit à l'aide de paramètres internes.

D'après moi, si nous attendons suffisamment longtemps, les deux faisceaux cesseront d'être cohérents. Ainsi, longtemps après la collision, nous pourrons localiser la particule et, si nous réalisons beaucoup d'expériences semblables, nous trouverons un résultat en accord statistique avec la théorie quantique. Mais si nous essayons de faire interférer les deux faisceaux suffisamment longtemps après la collision, nous les trouverons incohérents, en désaccord avec les prédictions de la théorie quantique. Ainsi, après une période intermédiaire limitée, pendant laquelle le paquet a été réellement scindé, un état final bien défini émerge. Le type de processus ici proposé peut être décrit à l'aide d'un modèle déterministe, puisqu'il n'est pas nécessaire de « prévoir » dans l'état initial quelle expérience sera éventuellement réalisée sur la particule.

Pour compléter l'image que nous proposons, nous ajouterons la remarque suivante. Lorsqu'un paquet d'ondes se décompose par collision sur une barrière de potentiel, nous supposons que les deux parties s'unissent éventuellement sous forme d'un paquet définitive-

ment réfléchi ou d'un paquet définitivement transmis. Il est vraisemblable qu'au bout d'un temps suffisamment long, une telle unification se produira spontanément après qu'une séparation suffisante ait eu lieu, mais il est également vraisemblable que cette unification peut être catalysée par interaction du paquet avec des atomes placés des deux côtés de la barrière. Car une fois que le paquet a engendré un ion ou a excité un atome d'un côté de la barrière, il faut que ce paquet se soit concentré en un paquet entièrement de ce côté de la barrière, indépendamment du fait que cet ion ou cet atome excité aient été observés ou non.

La question de savoir si c'est l'image déterministe ici proposée ou la conception orthodoxe qui donne une meilleure description des faits peut en principe être résolue au moyen d'expériences destinées à rechercher si les composantes d'un faisceau d'électrons décomposé restent indéfiniment cohérentes ou non. Cette expérience a peu de chance de succès sous cette forme, car pratiquement les composantes ψ_1 et ψ_2 se comporteront, longtemps après la collision, même du point de vue orthodoxe, comme si elles étaient incohérentes, à cause de la bande de fréquences nécessairement contenue dans le paquet d'ondes initial. La différence entre les vues anciennes et les nôtres porte sur le point suivant : la distribution des électrons longtemps après la collision est-elle décrite par

$$|A\psi_1|^2 + |B\psi_2|^2 \qquad (6a)$$

ou par

$$|A\psi_1 + B\psi_2|^2 \qquad (6b)$$

La difficulté de trancher cette question provient de ce qu'il n'y a pas entre ces deux expressions de différence suffisamment marquée, sur laquelle on pourrait fonder une expérience cruciale. Tenant compte de cette difficulté de trancher expérimentalement, nous préférons pour le moment l'expression (6*a*) qui permet une description déterministe des phénomènes, et nous rejetons (6*b*) qui implique toutes les conséquences de la théorie quantique.

§ 20. Alors que la réflexion et la transmission d'un électron par une barrière de potentiel ne semblent pas convenir pour donner des arguments expérimentaux en faveur de nos considérations ou contre elles, il paraît y avoir au moins deux possibilités expérimentales de vérifier la validité de nos affirmations.

1. On peut discuter la décomposition d'un photon d'une façon parfaitement analogue à celle de la décomposition d'un électron. La

question pourrait être posée de savoir si deux faisceaux cohérents de lumière restent cohérents même s'ils s'éloignent considérablement l'un de l'autre. Cette question n'a pas de rapport avec la question bien connue de la longueur de cohérence finie de la lumière. La question est plutôt la suivante. Prenons un interféromètre de Michelson et augmentons la longueur des bras sans accroître la différence de phase entre les deux faisceaux : l'interférence cesse-t-elle lorsque les bras deviennent trop longs ? De même, on peut poser la question de savoir si, dans l'expérience de Sagnac, les franges d'interférence disparaissent lorsque la surface limitée par le trajet des deux faisceaux devient très grande.

Nous croyons que, dans les deux cas, l'interférence cesse si les écarts deviennent supérieurs à une certaine quantité, puisque l'interférence requiert la décomposition temporaire d'un photon, et que si l'appareil devient trop grand, les deux parties séparées du photon pourront avoir tendance à s'unir spontanément avant de terminer leur trajet dans l'interféromètre. Si les deux parties du photon s'unissent par notre processus de constriction, les deux faisceaux deviendront incohérents.

Les expériences de Michelson et de Sagnac ont été réalisées avec des dispositifs d'assez grandes dimensions ; ainsi la limite supérieure de séparation d'un photon excède certainement plusieurs mètres.

2. Si nous supposons que le paquet correspondant à un électron ne peut demeurer séparé de façon permanente, il est également plausible d'admettre qu'un tel paquet ne peut devenir arbitrairement grand. Si nous considérons la fonction d'onde d'un électron dans un atome d'hydrogène, nous savons que le rayon du paquet d'ondes représentant l'électron sur une orbite de nombre quantique n est

$$r_n = n^2 r_H$$

où $r_H \sim 10^{-8}$ cm. est le rayon de Bohr. Nous pouvons ainsi nous attendre à certaines modifications dans le spectre de l'hydrogène pour les grands nombres quantiques, pourvu que l'électron manifeste une tendance à ne pas dépasser certaines dimensions. Le spectre de Balmer a été observé jusqu'à n $\sim$ 30, le nuage électronique peut donc s'étendre au moins jusqu'à une dimension

$$r_{30} \sim 10^{-5} \text{ cm.}$$

Les observations actuelles de raies spectrales à nombres quantiques élevés sont toutefois trop imprécises pour révéler si ces raies

ont ou non les fréquences prédites par la théorie. De ce point de vue, il serait très utile d'étudier en détail les états hautement excités de l'hydrogène à pression extrêmement basse.

3. Notre image du photon qui se concentre à une conséquence quelque peu paradoxale qui pourrait conduire à l'observation d'un nouvel effet observable expérimentalement. Supposons qu'un atome *A* émette un photon sous forme d'une onde sphérique. Supposons de plus qu'il y ait, à des distances variées de *A*, un certain nombre d'atomes *B*, *C*..., susceptibles d'absorber le photon. Le plus proche de ces atomes, soit *B*, a une chance d'absorber le photon avant qu'il ait interagi avec les autres atomes plus éloignés. Mais si *B* absorbe le photon, celui-ci n'atteindra plus les autres atomes. Ainsi, s'il y a un atome *B* à proximité de l'atome *A*, la présence de cet atome réduira la probabilité que le photon soit absorbé par un atome *C* plus éloigné de *A* que *B*, même si *C* et *B* sont situés par rapport à *A* dans des directions opposées. Nous pourrions exprimer ceci en disant que l'atome *B* porte une ombre tout autour de *A*. Comme il ne nous est pas possible de proposer une théorie quantitative du photon qui se contracte, il est inutile maintenant de tenter de discuter les détails de ce processus : cependant, il serait intéressant d'entreprendre des expériences sur des photons afin de clarifier cet effet (...).

§ 22[8]. — Le paragraphe 21 avait pour objet de montrer à l'aide d'un exemple comment il est possible de concevoir une modification non linéaire de l'équation de Schrödinger telle qu'elle conserve les traits essentiels de la mécanique ondulatoire et n'affecte que des résultats pour lesquels les prédictions de la mécanique ondulatoire ancienne ne semblent pas solidement établis. Notre discussion de ce modèle non linéaire est toutefois restée incomplète, puisque nous n'avons pas pu montrer qu'il conduit à des résultats statistiques corrects, par exemple, si les probabilités de réflexion et de transmission d'un paquet sont pour l'essentiel en accord avec celles obtenues par la méthode usuelle. J'espère étudier ce problème dans un proche avenir.

Une autre difficulté de notre modèle est qu'il semble applicable seulement à des problèmes à un seul corps. Schrödinger avait précisément abandonné sa conception de l'électron étalé à cause de la difficulté de l'étendre aux problèmes à plusieurs particules. Cette

8. Nous avons dû, faute de place, renoncer à reproduire ici le § 21 ; les spécialistes qui désireront en prendre connaissance pourront se reporter au texte original de cet article (*N.d.l.R.*).

difficulté pourrait être surmontée, à notre avis, en introduisant une claire distinction entre la fonction d'onde ψ et l'amplitude a. Nous avons admis dans l'exemple du paragraphe précédent que dans le cas d'un paquet d'ondes simple, $\psi \sim a$ pour des temps tels que ψ ne s'étende pas sur une région trop grande. Cette hypothèse peut être généralisée en abandonnant complètement toute connexion directe entre a et ψ, et en supposant seulement qu'une certaine moyenne de a prise par rapport au temps est égale à ψ. Ainsi, dans le problème à un seul corps, nous pouvons supposer que

$$\frac{1}{2\delta}\int_{-\delta}^{\delta} |a(\mathbf{r}, t+\tau)|^2 \, d\tau = |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 \qquad (23)$$

où δ n'est pas trop grand. Si nous acceptons (23), nous pouvons généraliser et supposer que dans le cas d'un problème à deux corps par exemple,

$$\frac{1}{2\delta}\int_{-\delta}^{\delta} |a_1(\mathbf{r}_1, t+\tau)|^2 |a_2(\mathbf{r}_2, t+\tau)|^2 \, d\tau = |\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t)|^2 \qquad (24)$$

ou a_1 et a_2 sont les amplitudes de deux électrons et ψ $(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t)$ la fonction d'onde de Schrödinger décrivant l'état des deux électrons ensemble.

L'équation (24) possède certains traits généraux plausibles, ainsi l'intégration par rapport à $\mathbf{r}_1$ ou $\mathbf{r}_2$ donne une relation du type (23). La symétrie de $|\psi|^2$ requiert une certaine connexion entre a_1 et a_2, mais cette connexion est nettement plus faible que $a_1(\mathbf{r}, t) = a_2(\mathbf{r}, t)$. Une interdépendance entre les deux amplitudes a_1 et a_2 est en effet vraisemblable puisque le mouvement de l'un des électrons n'est pas indépendant de celui de l'autre.

La très brève esquisse que nous avons donnée ici est destinée seulement à prouver qu'il n'est pas impossible en principe de généraliser le modèle de l'électron étalé de Schrödinger aux problèmes à plusieurs corps.

L. JANOSSY

The physical Aspects of the Wawe-Particle Problem, *Acta Physica Hungarica*, 1952, t. I, fasc. 4, pp. 423-446.

Traduit par Eugène COTTON.

Appendice I

Nous reproduisons ci-après un extrait d'une conférence remarquable prononcée par M. Planck en 1935, *sous le titre* Die Physik im Kampf um die Weltanschauung, *bien que nous ne soyons pas d'accord avec toutes les opinions exprimées dans ce passage* (L.J.).

Voyons maintenant comment les choses se présentent. A la base de la physique théorique, il y a la reconnaissance de l'existence de processus réels et indépendants de nos sensations. Cette hypothèse doit être conservée absolument et en toutes circonstances ; même les physiciens d'orientation positiviste s'en servent en fait. Car, même s'ils tiennent à la primauté des sensations comme unique base de la physique, ils sont pourtant obligés, pour échapper à un solipsisme déraisonnable, de supposer qu'il existe des illusions individuelles des sens, des hallucinations, et ne peuvent exclure celles-ci qu'en exigeant que les observations physiques soient toujours reproductibles. Mais, de ce fait, on énonce une idée qui n'était nullement évidente au début, à savoir que les relations fonctionnelles entre les sensations renferment certains éléments indépendants de la personnalité de l'observateur, ainsi que du temps et du lieu de l'observation ; ce sont justement ces éléments que nous désignons comme réels dans le phénomène physique, ce sont eux que nous cherchons à saisir dans leur conformité à des lois.

Mais, à l'hypothèse de l'existence de processus réels, la physique classique a ajouté, comme nous l'avons vu, la supposition que l'on pouvait connaître intégralement les lois des processus réels en divisant en parties toujours plus petites l'espace et le temps. Cette supposition contient en fait, si on y regarde de plus près, une restriction importante. On en déduit que, par exemple, les lois d'un processus réel peuvent être entièrement comprises lorsqu'on le sépare du processus à l'aide duquel on le mesure. On peut alors faire la réflexion suivante : le processus de mesure ne pourra fournir une connaissance du processus réel que s'il existe une relation causale entre les deux mais s'il existe une telle relation causale, le processus de mesure in

fluencera plus ou moins le processus réel et le perturbera d'une certaine façon; en conséquence, le résultat de la mesure sera faussé. Cette perturbation et l'erreur qu'elle engendre seront d'autant plus importantes que la relation causale entre l'objet réel et l'appareil de mesure sera plus serrée et plus fine. La perturbation sera diminuée si l'on peut desserrer la liaison causale, ou encore, peut-on dire, augmenter la distance causale entre l'objet et l'appareil de mesure. On ne peut réduire à zéro la perturbation, car si on prend une distance causale infiniment grande, c'est-à-dire si on sépare complètement l'objet de l'instrument de mesure, on n'apprend absolument rien sur le processus réel.

Puisque les mesures sur des atomes et électrons individuels nécessitent des méthodes extrêmement raffinées et sensibles, c'est-à-dire exigent une distance causale très faible, on comprend que la détermination précise de la position d'un électron soit liée à une perturbation proportionnelle de son état de mouvement et, inversement, que la mesure précise de la vitesse d'un électron nécessite un intervalle de temps proportionnellement long. Dans le premier cas, on perturbe la vitesse de l'électron, dans le second cas, c'est la position de l'électron dans l'espace qui s'embrouille. On a ainsi une explication causale pour la relation d'imprécision dont on a parlé plus haut.

Bien que ces explications semblent parfaitement claires, elles ne sauraient atteindre ce qui constitue à proprement parler le fond de notre problème. Car le fait qu'un processus physique réel puisse être perturbé par un instrument de mesure est également bien connu en physique classique. Et l'on ne voit pas de prime abord pourquoi le progrès des méthodes de mesure ne rendrait pas possible de calculer à l'avance la perturbation subie par un électron. C'est pourquoi il est nécessaire, pour expliquer la faillite de la physique classique dans le domaine des phénomènes microscopiques, de fouiller encore un peu plus profond.

Un progrès important dans cette voie fut l'édification de la mécanique quantique ou ondulatoire, dont les équations permettent, à l'aide de règles bien déterminées, de calculer les processus atomiques observables en plein accord avec l'expérience. Il est vrai que la mécanique quantique ne fournit pas comme la mécanique classique la position d'un électron individuel à un instant déterminé : elle ne donne que la probabilité qu'un électron se trouve à un instant déterminé dans une position arbitrairement choisie, ou encore on peut dire aussi qu'elle

donne, pour un grand nombre d'électrons, le nombre de ceux qui, à un instant déterminé, se trouvent en un endroit donné.

Ceci est une loi de caractère purement statistique. Sa confirmation parfaite par toutes les mesures existantes d'une part, le fait des relations d'imprécision d'autre part, ont conduit un certain nombre de physiciens à considérer que les lois de caractère statistique constituent une base unique et définitive pour toutes les lois dans le domaine de la physique atomique et à déclarer que le problème de la causalité des événements individuels n'a pas de sens physique.

Ici, nous arrivons à une question qu'il est très important d'étudier soigneusement, parce qu'elle touche profondément au problème fondamental des buts et réalisations de la physique. Si l'on considère comme but de la science physique la découverte des relations conformes à des lois entre les processus réels dans la nature, la causalité doit faire partie de l'essence même de la physique; le fait de l'écarter pour des raisons de principe doit alors être considéré pour le moins comme très criticable.

D'abord, il faut remarquer que l'existence de lois de caractère statistique est parfaitement compatible avec la validité d'une causalité stricte. La physique classique contient déjà de nombreux exemples de ce fait. Ainsi, si l'on explique la pression qu'exerce un gaz sur les parois d'un récipient qui le renferme par des chocs irréguliers contre celles-ci des nombreuses molécules du gaz, qui s'agitent chaotiquement dans toutes les directions, il n'existe aucune contradiction entre cette explication et le fait que le choc d'une molécule individuelle contre la paroi ou contre une autre molécule obéit à une loi parfaitement déterminée et est par conséquent complètement déterminé de façon causale. On peut objecter que la causalité stricte d'un processus ne peut être considérée comme irréfutablement établie que si l'on est capable de prédire exactement le déroulement d'un processus, mais que personne ne peut contrôler le mouvement d'une molécule individuelle. On répondra à cela qu'une prédiction réellement exacte d'un phénomène quelconque de la nature n'est en somme possible dans aucun cas, et qu'il ne saurait donc être question d'une vérification expérimentale immédiate exacte de la loi de causalité. Chaque mesure, aussi précise soit-elle, comporte des erreurs d'observation inévitables. C'est pourquoi le résultat expérimental, aussi bien que chaque erreur d'observation, sont rattachés à certaines conditions causales. Si, au bord de la mer, nous considérons le jeu de l'écume, rien ne nous empêche d'être persuadés que chaque bulle d'eau obéit dans son mouve-

ment à des lois causales strictes, bien qu'il ne nous soit pas possible de suivre en détail sa naissance et sa disparition, et encore moins de la caculer à l'avance.

Mais c'est ici qu'entrent en lice les relations d'imprécision. Aussi longtemps que règnait la physique classique, on pouvait espérer que les erreurs d'observation inévitables pourraient être diminuées en deçà de toute limite en augmentant la précision des appareils de mesure. Cet espoir a été réduit à néant depuis la découverte du quantum d'action. Car le quantum d'action établit une limite objective déterminée à la précision que l'on peut atteindre ; au delà de cette limite, il n'y a plus de causalité, mais seulement incertitude et hasard.

Nous avons déjà préparé la réponse à cette objection. La raison de l'imprécision des mesures en physique atomique n'est pas nécessairement une faillite de la causalité, elle peut très bien tenir à une erreur dans la formation des concepts et, par conséquent, dans la position de la question.

Ce sont justement les interactions entre le processus de mesure et le processus réel qui permettent, au moins dans une certaine mesure, de comprendre les relations d'imprécision sur une base causale. Nous ne pouvons suivre le mouvement d'un électron individuel, de même que nous ne pouvons voir une image en couleur dont les dimensions sont inférieures à la longueur d'onde correspondant à sa couleur.

Il est certain que nous devons rejeter comme dépourvue de sens l'idée que l'on pourrait abaisser indéfiniment, grâce aux progrès des techniques de mesure, l'incertitude des mesures physiques. Mais, justement, l'existence d'une limite objective, représentée par le quantum d'action élémentaire, doit indiquer la validité de certaines lois nouvelles, qui ne peuvent certainement pas, de leur côté, être ramenées à des lois statistiques. Comme le quantum d'action, toute autre constante élémentaire (par exemple la charge ou la masse d'un électron) constitue une grandeur absolue réelle, donnée, et il me paraît tout à fait aberrant de vouloir lui associer une incertitude de principe, ce que devraient faire les négateurs de toute causalité s'ils étaient conséquents avec eux-mêmes.

Que la précision des mesures en physique atomique soit limitée en principe, on le comprend puisque les appareils de mesure sont eux-mêmes constitués d'atomes et que la précision de tout instrument de mesure est limitée par la sensibilité avec laquelle il répond. On ne saurait peser avec une bascule au milligramme près.

Mais si l'on ne dispose que de bascules, et si l'on n'a aucune

chance de pouvoir se procurer des balances plus fines ? Ne vaudrait-il pas mieux alors renoncer par principe à des pesées plus précises et admettre que la question du poids d'un corps à un milligramme près est dénuée de sens, plutôt que de poursuivre un problème qui ne saurait être résolu par des mesures directes ? Adopter une telle solution serait sous-estimer la signification de la théorie. Car la théorie nous mène, d'une façon imprévisible de prime abord, au delà des mesures directes, au moyen des « expériences mentales » (*Gedankenexperimente*), qui nous rendent largement indépendants des défauts des instruments réels.

Rien n'est plus faux que l'affirmation selon laquelle une expérience mentale ne posséderait une signification que dans la mesure où elle est effectivement réalisable par une mesure. Il n'y aurait alors aucune démonstration de géométrie exacte. Car chaque trait que l'on peut tracer sur le papier n'est pas en réalité une ligne, mais une bande plus ou moins étroite, chaque point est en réalité une tache plus ou moins grande. Cependant, nous ne doutons pas de la force de démonstration des constructions géométriques. Avec les expériences mentales, l'esprit du chercheur s'élève au-dessus du monde des appareils de mesure réels, elles l'aident à former des hypothèses et à formuler des questions dont l'examen par des expériences réelles lui permet d'entrevoir de nouveaux rapports régis par des lois, même des rapports inaccessibles à des mesures réelles. Une expérience mentale n'a pas de limites de précision, car l'imagination est plus fine que les atomes et les électrons ; également, le danger d'une modification causale du processus étudié par l'appareil de mesure n'existe plus pour une telle expérience. La seule condition dont dépend la réalisation et le succès d'une expérience mentale est l'hypothèse qu'il existe des relations régies par des lois non contradictoires entre les processus analysés. Car on ne peut s'attendre à trouver ce que l'on a supposé à l'avance ne pas exister.

Certainement, une expérience mentale est une abstraction. Mais cette abstraction est aussi indispensable au physicien (qu'il soit expérimentateur ou théoricien) dans sa recherche que l'hypothèse qu'il existe un monde extérieur réel, car de même que pour chaque processus que nous observons dans la nature, nous devons supposer quelque chose qui se déroule indépendamment de nous, nous devons d'autre part tendre à nous affranchir le plus possible des imperfections de nos sens et de nos méthodes de mesure et à nous élever à un point de vue supérieur pour voir au delà des particularités individuelles des

phénomènes. Ces deux abstractions sont dans une certaine mesure opposées. Au monde réel, en tant qu'objet, fait face l'esprit idéal qui le considère en tant que sujet. Ni l'un, ni l'autre ne peuvent être déduits logiquement et c'est pourquoi il n'est pas possible de réduire à l'absurde ceux qui les nient. Mais chaque fait de l'histoire témoigne que tous les deux ont joué dans le développement de la physique un rôle décisif. Les plus grands esprits et novateurs de la physique, comme les Kepler, Newton, Leibniz, Faraday, étaient inspirés d'une part par leur croyance en la réalité du monde extérieur, d'autre part par leur croyance en l'existence d'une raison supérieure en ce monde ou au-dessus de lui.

On ne devrait jamais oublier que toutes les idées créatrices en physique prennent leur origine à ces deux sources, le plus souvent d'abord sous une forme plus ou moins provisoire due aux particularités de la fantaisie du chercheur individuel, puis ensuite sous des formes plus déterminées et plus indépendantes. Il est certain qu'en physique, il a toujours existé aussi un certain nombre d'idées fausses, à propos desquelles beaucoup de travail inutile a été dépensé. Mais, d'un autre côté, il y a eu aussi maints problèmes qui, déclarés d'abord dénués de sens par des critiques mordants, se sont révélés extrêmement importants. Il y a peine 50 ans, la question de la détermination de la masse d'un atome individuel était considérée comme dénuée de sens physique, comme un faux problème par les physiciens d'inspiration positiviste, parce qu'inaccessible à l'investigation scientifique. Aujourd'hui, il est possible de déterminer la masse d'un atome à un dix millième près, bien que nos balances les plus sensibles pour la mesure directe soient aussi peu adaptées à cette mesure qu'une bascule à la mesure de milligrammes.

C'est pourquoi, il faut bien se garder de considérer comme un faux problème un problème pour la solution duquel on n'aperçoit tout d'abord aucune voie claire. Il n'y a pas de critère qui permette de décider à priori si un problème donné possède un sens physique ou non. C'est là un point dont souvent les positivistes ne sont pas conscients. La seule possibilité d'apprécier correctement un problème est d'examiner les conséquences auxquelles il conduit. C'est pourquoi, compte tenu de la signification fondamentale que revêt pour la science physique l'hypothèse de l'existence de lois rigoureuses, nous ne devons pas déclarer prématurément dénuée de sens la question de leur applicabilité à la physique atomique. Mais nous devons d'abord tout essayer pour découvrir le moyen de résoudre le problème de l'existence de lois dans ce domaine.

APPENDICE II[9]

L'article ci-dessus a été écrit il y a sept ans. A cette époque j'ignorais malheureusement le travail alors récent de de Broglie et de Vigier et par conséquent je ne donnais pas de discussion de leurs tentatives, inspirées par des idées assez étroitement apparentées avec celles qui m'ont conduit à critiquer la mécanique quantique.

Mon point de vue, qui est exprimé dans le § 1 du présent article, est que les difficultés philosophiques de la théorie quantique ne peuvent pas être résolues sans certains changements profonds dans la mécanique quantique ; de tels changements laisseraient beaucoup des résultats de la théorie quantique inchangés, mais certainement pas tous. Par conséquent, pour contrôler de façon aussi directe et aussi précise que possible les concepts fondamentaux de la théorie quantique, il est très important de faire un certain nombre d'expériences. C'est seulement quand nous aurons trouvé quelque désaccord entre les prédictions théoriques et les résultats expérimentaux que nous pourrons tenter sérieusement de reformuler la théorie ; actuellement, l'analyse des prédictions de la théorie semble rendre très probable que de tels désaccords doivent exister.

Avant de commencer à réaliser des expériences soignées, il est nécessaire d'analyser les preuves expérimentales déjà disponibles en faveur de la théorie. J'ai tenté de faire une telle analyse, et je suis arrivé à ce résultat assez surprenant que certaines des lois les plus fondamentales, que l'on suppose généralement prouvées par de nombreuses expériences, sont beaucoup moins solidement établies qu'on ne le croit généralement. Un exemple frappant dans ce sens est l'analyse des preuves expérimentales de la loi relativiste de variation de la masse avec la vitesse : les résultats de l'analyse ont été publiés récemment [15] ; de même, l'analyse des preuves expérimentales relatives aux interférences lumineuses aux faibles intensités [16] montre que les lois fondamentales dans ce domaine n'ont pas été dans le passé très solidement vérifiées par des expériences.

---

9. Nous remercions le professeur Jànossy, qui a bien voulu écrire pour *Recherches Internationales* ce nouvel appendice, de même qu'il a mis au point la bibliographie et apporté quelques minimes modifications au texte original de son étude (*N.d.l.R.*).

Nous donnons une brève description de deux résultats expérimentaux obtenus dans notre laboratoire, à Budapest. Ces expériences concernent les questions discutées dans le § 5 de l'article ci-dessus.

On a employé un dispositif expérimental schématisé par la *fig.* 3 [17]. Le faisceau incident était séparé en deux composantes cohérentes α et β et les photons se propageant dans ces faisceaux étaient comptés par des compteurs de photons. Il a été établi qu'il n'y a pas de coïncidences entre les photons trouvés dans les deux faisceaux; ainsi, exception faite des coïncidences fortuites, les photons dans α et β arrivaient à des instants différents, montrant que chaque photon « choisit » son chemin. Chaque photon est, soit transmis, soit réfléchi, il ne se produit pas d'événements qui indiqueraient qu'un photon s'est séparé en deux et que les demi-photons ont déclenché les compteurs simultanément. La précision de nos expériences était telle que l'on peut exclure l'éventualité où la proportion de photons se comportant de manière irrégulière dépasserait 1/2 %.

Des expériences plus précises, qui ont eu des résultats semblables, ont été réalisées depuis par Brannen et Ferguson [18].

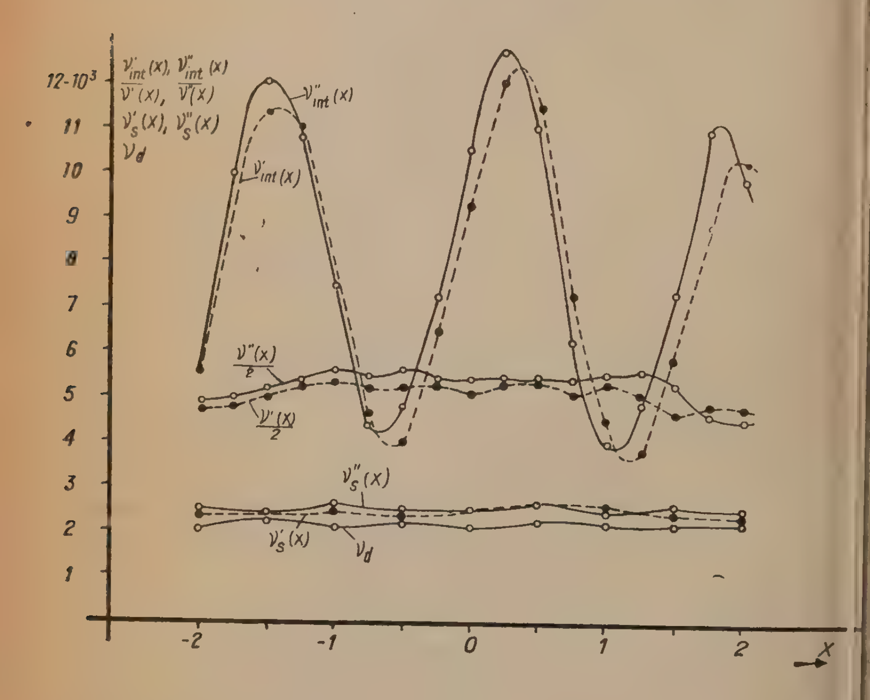
Quelques remarques au sujet de ces résultats semblent nécessaires.

1. On a critiqué les expériences en remarquant que, même si les photons s'étaient divisés, notre dispositif n'aurait pas été adapté à l'enregistrement de ces photons divisés, parce que, vraisemblablement, un demi-photon, s'il existait, ne pourrait pas actionner le compteur de photons. Cet argument semble sans fondement : l'intensité totale des faisceaux α et β est à peu près égale à celle du faisceau primaire *a*. Si de nombreux photons s'étaient divisés et si les demi-photons avaient été incapables de déclencher le compteur de photons, la division des photons aurait causé une grande perte d'intensité et l'intensité totale des faisceaux α et β aurait été considérablement inférieure à celle de *a*. Le fait que l'intensité totale de α et β soit égale à celle de *a* montre que, *ou bien* aucun photon ne se divise, *ou bien*, si des photons se divisent, un demi-photon déclenche le compteur avec une probabilité p/2, où p est la probabilité qu'un photon entier, arrivant dans le compteur, déclenche sa réponse.

On a indiqué récemment que, dans certaines conditions, on doit s'attendre à un certain taux de coïncidences entre photons dans des faisceaux cohérents. J'ai discuté ce problème dans un récent article [19], où on trouvera les références d'une partie de la littérature.

2. Des expériences du type décrit au § 3 ont été réalisées en col-

laboration avec Zs. Naray [20], avec un dispositif schématiquement décrit par la *fig.* 2 ; les expériences ont été réalisées avec des intensités lumineuses suffisamment faibles pour que l'on puisse être certain qu'à un instant quelconque, le nombre moyen de photons contenus dans l'appareil était très inférieur à un. Dans certaines des expériences, on a employé un interféromètre avec des bras de 14 m. de long. Les franges d'interférences étaient obtenues en comptant le nombre de photons qui parvenaient par unité de temps aux différents points de la figure. A titre d'illustration, nous donnons le résultat d'une des séries de mesures (*fig.* 6). La courbe en trait plein donne



le nombre de photons par unité de temps aux différents points de la figure, quand l'intensité lumineuse est grande et le dispositif contient beaucoup de photons à la fois, la courbe en trait interrompu donne la distribution dans le cas d'une faible intensité. Dans les deux cas, les nombres de photons par unité de temps sont divisés par les intensités absolues correspondantes. Les deux courbes coïncident, aux erreurs d'expérience près, montrant que les figures d'interférences sont

pratiquement identiques, qu'il y ait beaucoup de photons se propageant ensemble dans l'interféromètre ou que les photons arrivent sur celui-ci un par un.

Les expériences ainsi décrites ont donné une solide confirmation expérimentale des prédictions de la théorie sur le comportement de la lumière. Toute tentative de modifier le formalisme de la théorie actuelle doit être conçue de façon à ne pas contredire ces résultats.

Nous préparons un certain nombre d'autres expériences et nous espérons faire à nouveau le point de la situation lorsque nous disposerons de plus de résultats expérimentaux de ce genre.

Bibliographie

1*a*. — D. I. Blokhinzev : *Principes de la mécanique quantique*, Moscou 1949, § 129 (en russe; il existe une édition hongroise).

1*b*. — D. I. Blokhinzev : *Doklady* de l'Ac. des Sc. de l'U.R.S.S., *82*, 553, 1952 (voir également dans cet article les références des travaux antérieurs du même auteur).

2. — J. I. Frenkel : *Uspèkhi Fizitcheskikh Naouk*, *41*, 110, 1951.

3. — V. A. Fock : *Uspèkhi Fizitcheskikh Naouk*, *45*, 4, 1951.

4. — A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen : *Phys. Rev.*, *47*, 777, 1936.

5. — L. de Broglie : *La Physique quantique restera-t-elle indéterministe ?* Gauthier-Villars, Paris 1953.

6. — J.-P. Vigier : *Physique relativiste et physique quantique*, Gauthier-Villars, Paris 1953.

7. — D. Bohm : *Phys. Rev.*, *85*, 166, 1952.

8. — M. Planck : *Die Physik in Kampf um die Weltanschauung*, J. A. Barth, Leipzig, 1937.

9. — M. Planck : *Ann. d. Phys.* *37*, 261, 1940 ; *40*, 481, 1941.

10. — P. Selényi : *Ann. d. Phys.*, *35*, 444, 1911.

11. — P. Selényi : *Z. f. Phys.*, *108*, 401, 1938.

12. — E. Schrödinger : *Ann. d. Phys.*, *61*, 69, 1920.

13. — S. I. Vavilov : *Microstructure de la lumière*, Moscou 1950 (en russe).

14. — P. Dirac : *Principles of Quantum Mechanics*, 3rd edition, Oxford 1947.
15. — P.S. Farago et L. Jánossy : *Nuovo Cimento*, *5*, 1411, 1957.
16. — L. Jánossy et Zs. Naray : *Nuovo Cimento*, sous presse.
17. — A. Adam, L. Jánossy et P. Varga : *Acta Phys. Hung.*, *4*, 301, 1955 (en russe) ; *Ann. d. Phys.*, *16*, 408, 1955.
18. — E. Brannen et H.I.S. Ferguson : *Nature*, *177*, 481, 1956.
19. — L. Jánossy : *Nuovo Cimento*, *6*, 111, 1957.
20. — L. Jánossy et Zs. Naray : *Nuovo Cimento*, sous presse.

COMPLEMENTARITE ET MATERIALISME DIALECTIQUE

Per voler sostenere un errore è forza di commetterne cento, e, quel ch'è peggio, restar in ultimo a piedi. GALILEO.

INTRODUCTION

Depuis quelques années une controverse s'est rouverte sur un problème que beaucoup d'hommes sages avaient cru résolu et liquidé pour toujours. Il s'agit de l'interprétation de la théorie des quanta, c'est-à-dire de la signification et du domaine d'application de l'instrument théorique très précis qui fut créé dans le but de décrire, d'expliquer et de prédire le comportement de la matière à l'échelon de l'atome.

Diverses tendances philosophiques (souvent représentées par le même interlocuteur) participent à cette controverse, qui est de nature essentiellement philosophique et non pas purement technique, étant donné qu'elle se rapporte au problème de la connaissance en général et à des particularités très profondes et générales de la nature.

Bien entendu, le matérialisme dialectique a pris part, lui aussi, à ces discussions, il a été sollicité de donner son appui à des conceptions de la nature de la mécanique des quanta très éloignées les unes des autres. Le présent article traite d'une tentative récente de concilier le matérialisme dialectique et l'interprétation habituelle de la mécanique des quanta, conforme à la théorie de la complémentarité :

celle du professeur Rosenfeld[1], physicien théoricien de Manchester bien connu, qui a pris, au nom du matérialisme dialectique, la défense de l'interprétation orthodoxe de la mécanique des quanta et de toute la philosophie qui s'y rapporte.

Cela vaut la peine d'examiner ses arguments, afin de voir si nous devrions, ainsi qu'il le propose, modifier la théorie de la connaissance, pour tenir compte de la doctrine de la complémentarité et compléter ainsi les vieux Marx et Engels en puisant dans la philosophie positiviste à la mode[2].

I. Chez le sorcier

Le professeur Rosenfeld commence son article par l'affirmation suivante : « Si l'on voulait résumer brièvement en une formule concise l'acquisition fondamentale de la théorie des quanta, il faudrait dire qu'elle a mis fin au dualisme de la matière et de la force, qui avait été le leitmotiv de la pensée scientifique depuis l'époque de Newton. Selon la théorie des quanta, chaque agent physique participe aux propriétés exprimées par ces deux concepts et son aspect matériel ou dynamique peut pour ainsi dire être évoqué en choisissant convenablement les circonstances de l'observation » (p. 393).

Tout d'abord, il faut dire que le langage de l'auteur manque quelque peu de rigueur. Par « matière » il semble entendre *corps*, en particulier *corpuscule*, tandis que par « force » il semble désigner le *champ*, en particulier l'*onde*. Mais étant donné que, contrairement à Rosenfeld[3], nous ne partageons pas l'opinion de Condillac : *Une science n'est qu'une langue bien faite*, nous voulons en venir au fait.

Le plus important est que, selon le texte cité plus haut,

1° le dualisme ou polarité en question n'est pas considéré comme *objectif*, comme une qualité des micro-objets, étant donné qu'il n'est pas

---

1. L. Rosenfeld : « Strife about complementarity », *Science Progress*, 1953, n° 163, pp. 393-410. Toutes les indications de page se rapportent à cet article, qui est une traduction revue de « L'Evidence de la Complémentarité », étude publiée dans : *Louis de Broglie, Physicien et penseur*, sous la direction de André George (Paris : Albin Michel, 1952).

2. Nous n'examinerons ici qu'une partie des arguments de Rosenfeld ; d'autres arguments, plus techniques, sont traités par l'auteur dans « Strife about Complementarity », *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 6, pp. 1-12 et 141-154 (1955).

3. L. Rosenfeld : *The Foundations of Quantum Mechanics* (Conférence), São Paulo (Brésil), août 1953.

supposé que les deux aspects, ondulatoire et corpusculaire, sont indépendants de la façon dont ils sont observés : chaque aspect ne peut être « évoqué à volonté » qu'en « choisissant convenablement les circonstances de l'observation » ou bien, comme le disent les manuels orthodoxes, chacun des deux aspects peut être créé à volonté par l'observateur ;

2° les aspects corpusculaire et ondulatoire ne sont absolument pas considérés comme *aspects*, étant donné qu'on ne suppose pas qu'ils existent objectivement en même temps : l'observateur « évoque » chacun d'eux en temps voulu, jamais en même temps, de sorte qu'ils ne se trouvent jamais en conflit ; c'est justement pourquoi ils sont appelés *complémentaires* l'un de l'autre.

Ainsi, on nous demande de croire que le vieux dualisme de la matière et de la force, ou du corps et du champ, serait surmonté simplement par le fait que leur désignation ne correspond à aucune réalité objective, mais à l'intervention du physicien-sorcier, qui a la liberté d'exiger *fiat corpusculum, fiat unda*. De plus, cette croyance devrait reposer sur l'affirmation que les deux « aspects » complémentaires de l'objet atomique ne peuvent exister en même temps, pour la simple raison que le dispositif de mesure qui suscite l'un d'entre eux est incompatible avec le dispositif expérimental suscitant l'autre (ou lui est complémentaire).

C'est ainsi que le dispositif expérimental destiné à mesurer la position d'un électron serait incompatible avec le dispositif utilisé pour mesurer son impulsion (ou lui serait complémentaire)..Les descriptions de ces expériences sont, par conséquent, appelées descriptions complémentaires. Il faut remarquer qu'elles sont considérées comme descriptions d'observations, comme rapports sur des mesures, et non pas comme descriptions de *choses observées* — parce que, affirme-t-on, il serait métaphysique de supposer l'existence de quelque chose qui sort de l'observable.

Résumons la doctrine de la complémentarité, telle que la présente Bohr et que Rosenfeld la défend :

1° onde et particule ne sont pas des propriétés des objets, mais des concepts ou images « conjugués », qui appartiennent à la description de mesures ;

2° ces descriptions ne peuvent être réunies en une seule image, elles doivent être utilisées chacune en son temps et c'est la tâche du sorcier-physicien de choisir l'une ou l'autre, étant donné que ce n'est pas une question de propriétés d'objets matériels, mais exclusivement une question de concepts.

Telle est la substance de la célèbre doctrine de la complémentarité, qui est le centre de l'interprétation usuelle de la mécanique des quanta, également appelée interprétation de Bohr[4] et Heisenberg[5].

Ce point de vue conservateur, qu'on a fait valoir il y a un quart de siècle et dont Rosenfeld est un représentant éminent, nie l'existence objective de la matière en mouvement, puisqu'il subordonne son existence aux conditions de l'observation — ce qui est justement un trait fondamental de l'idéalisme subjectif, que Berkeley a brièvement formulé comme suit : « Etre, c'est percevoir ou être perçu »[6].

En outre, la soi-disant synthèse de la matière et de la force, donc la synthèse de propriétés corpusculaires et ondulatoires, est illusoire. Premièrement, parce que dans l'interprétation orthodoxe ni particule ni onde ne sont considérées comme des aspects d'objets réels ; deuxièmement, parce qu'elles sont considérées comme incompatibles, donc

4. Niels Bohr : a) *La théorie atomique et la description des phénomènes*, traduction de : *Atomlehre und Naturbeschreibung* (Berlin : Springer, 1931) par A. Legros et L. Rosenfeld (Paris : Gauthier-Villars, 1932) ;
b) « Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution », *Journal of the Chemical Society* (Londres), 1932, pp. 349-384 ;
c) « Licht und Leben », *Die Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 245-250 (1953) ;
d) « Can Quantum-Mechanical Description of Reality be Considered Complete ? », *The Physical Review*, vol. 48, pp. 696-702 (1935) ;
e) « Kausalität und Komplementarität », *Erkenntnis*, vol. 6, pp. 293-303 (1936) ;
f) « Le problème causal en physique atomique », dans le recueil *Les nouvelles théories de la Physique* (Paris : Institut International de Coopération Intellectuelle, 1939), pp. 11-32 ;
g) « Newton's Principles and Modern Atomic Mechanics », dans le recueil publié par la Royal Society, *Newton Tercentenary Celebrations* (Cambridge, University Press, 1947) pp. 56-61 ;
h) « On the notions of Causality and Complementarity », *Dialectica*, vol. 2 p. 312 (1948). Réimprimé dans le recueil *Nature des Problèmes en Philosophie*, III (Paris : Hermann, 1949) ;
i) « Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics » dans P.A. Schilpp (éd.) *Albert Einstein : Philosopher-Scientist* (Evanston, Ill., The Library of Living Philosophers, 1949) pp. 201-241.

5. Werner Heisenberg : a) « Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik », *Zeitschrift für Physik*, vol. 43, pp. 172-198 (1927) ;
b) *Les principes physiques de la théorie des quanta*, traduction de *Die Physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* par B. Champion et E. Hochard (Paris : Gauthier-Villars 1932) ;
c) *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaften*, 7e éd. (Zurich : Hirzel, 1947) ;
d) « Der Begriff der « Abgeschlossenen Theorie » in der modernen Naturwissenschaft », *Dialectica*, vol. 2, pp. 331-336 (1948).

6. Cette formulation est souvent considérée comme fausse mais irréfutable. Voir un essai de réfutation par l'auteur dans « New Dialogues between Hylas and Philonous », *Philosophy and Phenomenological Research*, tome 15, p. 192 (1954).

s'excluant mutuellement, de sorte que, loin d'être réunies dans un troisième et nouveau concept, elles restent séparées, en dyade. Bref, l'interprétation usuelle ne combine pas onde et particule en une seule image et ne les montre pas l'une et l'autre objectivement liées, ni naissant l'une de l'autre ; ce dualisme, cette extériorité de catégories liées est, Hegel l'a montré [7], un trait fondamental du mécanisme et non de la dialectique, comme l'affirme Rosenfeld.

Jusqu'ici Rosenfeld a réussi à nous persuader que l'école de Copenhague qu'il représente est une variété de *l'idéalisme mécaniste* et non du matérialisme dialectique. Voyons si cela résulte simplement d'une maladresse d'expression ou s'il y a là un point de vue systématique.

II. Matérialisme ou empirisme ?

Quelques physiciens ont osé critiquer les dogmes de l'école de Copenhague. Au lieu de chercher à démontrer qu'ils se trompent, Rosenfeld les accuse d'idéalisme ; il a recours dans ce but à ce qu'il croit être un argument d'autorité : « Engels (suit un renvoi au chapitre II de *Ludwig Feuerbach*) a caractérisé de façon remarquablement claire ce qu'est essentiellement le matérialisme : contrairement à l'idéalisme, il considère la formation de nos idées et concepts comme le résultat d'un processus d'adaptation graduelle de notre esprit à l'expérience ; les idées ne sont pas au début mais à la fin de ce processus » (p. 401). Le lecteur pourra examiner de près ce chapitre d'Engels, mais il ne trouvera pas de telles pensées. Cela n'a rien d'étonnant, car la définition donnée par Rosenfeld ne convient nullement au matérialisme mais à l'empirisme. Engels dit à cet endroit [8] que la différence essentielle entre matérialistes et idéalistes est la suivante : ceux qui affirment le caractère premier de l'esprit par rapport à la nature sont des idéalistes, tandis que ceux qui considèrent la nature comme première en dernière instance sont matérialistes.

Certes, la doctrine de l'origine psychologique et du développement psychologique des idées est jusqu'à un certain point commune au ma-

7. Hegel : *Wissenschaft der Logik*, livre III, section II, chapitre 1.
8. Engels : *Ludwig Feuerbach et la fin de la philosophie classique allemande*, dans : Marx, Engels, *Etudes Philosophiques*, Editions Sociales 1947, pp. 21-30.

térialisme et à la *branche* matérialiste de l'empirisme [9], dont Bacon et Locke sont les représentants classiques ; c'est là le seul point qui cadre avec la définition du « matérialisme » par Rosenfeld.

Mais les positions de ces deux courants diffèrent aussi bien en ce qui concerne la nature des idées et de l'expérience qu'en ce qui concerne le rôle de la théorie et de la pratique; de plus, elle diffèrent par le fait que l'empirisme réduit la philosophie à la théorie de la connaissance, en niant la possibilité d'une ontologie. Par contre, le matérialisme ne comporte pas seulement une gnoséologie, mais également une théorie des traits fondamentaux généraux de la réalité — une ontologie — qui, dans le cas de ce qu'on appelle le matérialisme métaphysique, est mécaniste et qui, dans le cas du matérialisme dialectique, est appelée dialectique[10].

Même les manuels savent que le point de départ du matérialisme est la reconnaissance de la *matière* avec ou sans expérience humaine, tandis que l'empirisme est l'ensemble de théories qui affirme que l'*expérience* (humaine) est le point de départ de tout ce dont on peut discuter ; d'où les noms correspondants.

Le matérialisme affirme entre autres que l'expérience des sens nous renseigne sur des objets qui existent objectivement par eux-mêmes de façon autonome. Il affirme par exemple que, malgré les théoriciens de la complémentarité, un électron peut parfaitement se mouvoir, même si aucun physicien ne daigne observer son mouvement, par exemple au cas où l'électron se meut dans le crâne du théoricien de la complémentarité. Le matérialisme affirme également que le fait de penser est un processus matériel, qui se déroule dans les cerveaux de personnes vivantes, qui profitent de la richesse culturelle acquise par l'humanité au cours de son histoire ; le matérialisme dialectique, en particulier, insiste sur le fait que la liaison entre la pensée et « l'expérience » n'est pas *unilatérale*, comme le dit Rosenfeld, mais dialectique. En effet, la conscience elle-même, de son côté, est une « source » de connaissance et produit ses objets propres (idéels); elle n'est pas seulement un miroir des objets matériels, un organe qui coordonne les perceptions et les

9. Un empiriste conséquent ne peut concéder que l'expérience (perceptions, mémoire, sentiments, etc...) correspond aux réalités objectivement existantes, puisqu'il considère les données empiriques comme éléments derniers, irréductibles. En d'autres termes, pour être conséquent, l'empirisme doit être idéaliste, étant donné que son point de départ est le sujet empirique ; il existe cependant des empiristes inconséquents qui admettent l'existence d'objets matériels correspondant aux données des sens.

10. Cette affirmation a été démontrée par l'auteur dans son article « Does Materialism involve an Ontology ? » (à paraître ultérieurement).

distille, comme la représente l'empirisme. Selon le matérialisme dialectique, les idées ne se trouvent pas seulement à la *fin* du « processus d'adaptation graduel de l'esprit à l'expérience », comme le prétendent Aristote, Thomas d'Aquin, Locke et Rosenfeld; mais on les retrouve également au début d'un nouvel échelon, ce dont témoignent la simple existence d'actions projetées et celle de la physique théorique.

Le concept d'expérience est justement la clé de la compréhension — et également de l'embrouillement — des différences entre matérialisme et empirisme : ce dernier met l'accent sur « l'expérience » (qui peut également inclure l'expérience mystique), tandis que le matérialisme met l'accent sur la matière, qui existe indépendamment de l'expérience, mais que nous connaissons naturellement par l'expérience et en particulier par l'expérimentation, qui est une expérience dirigée par des idées. Lorsque l'expérience est considérée aussi bien comme l'unique origine de la connaissance que comme l'unique origine de l'existence, il s'agit de la branche idéaliste de l'empirisme, dont l'évêque Berkeley fut l'éminent représentant. C'est exactement de la même façon que l'expérience est considérée par Bohr, lorsqu'il met l'accent sur « le caractère subjectif de toute expérience »[11].

Lorsque, d'autre part, l'expérience est considérée comme travail, comme action de l'homme sur les choses et les autres êtres vivants, comme une phase du processus et non pas comme le processus tout entier ; lorsque cette phase n'est pas considérée comme définitive, mais comme quelque chose qui doit faire place à une théorie ayant pour but de comprendre l'expérience et d'expliquer sa nécessité, au lieu de la décrire simplement par une série de *procès-verbaux* comme le demandent les positivistes ; et lorsque à son tour la théorie est considérée comme un autre échelon, qui doit être mis à l'épreuve de la pratique et corrigé — alors nous n'avons plus affaire à l'empirisme mais au matérialisme dialectique[12].

Dans son « célèbre pamphlet politico-philosophique » — c'est ainsi que Rosenfeld (p. 401) appelle *Matérialisme et Empiriocriticisme* —, Lénine a montré la confusion qui se cache sous le terme

11. Voir *ouvr. cité* note 4a, p. 2.

12. Mao Tse-toung : *A propos de la pratique* (dans *Œuvres choisies*, t. I, Editions Sociales 1955), p. 364. Les phrases finales de cet article sont les suivantes : « La pratique, la connaissance, puis de nouveau la pratique et la connaissance, cette forme, dans sa répétition cyclique, est infinie ; en outre, le contenu de ces cycles de la pratique et de la connaissance s'élève chaque fois à un niveau plus élevé. Telle est dans son ensemble la théorie matérialiste dialectique de la connaissance, telle est la conception que se fait le matérialisme dialectique de l'unité du savoir et de l'action ».

trop vague d'expérience : « L'« expérience » couvre aussi bien en philosophie la tendance matérialiste que la tendance idéaliste et consacre leur confusion »[13]. « Le terme « expérience », sur lequel les adeptes de Mach bâtissent leur système, a longtemps servi de travestissement aux systèmes idéalistes. Avenarius et Cie en usent maintenant pour passer avec éclectisme, de l'idéalisme au matérialisme et inversement »[14]. « Ainsi donc, les tendances matérialistes et idéalistes de la philosophie, de même que celle de Hume et de Kant, peuvent sans contredit s'abriter sous le terme expérience, mais ni la définition de l'expérience comme objet d'étude, ni sa définition comme moyen de la connaissance ne résolvent la question »[15].

Seule est décisive la reconnaissance (qu'on ne trouve nulle part dans les œuvres de l'école de Copenhague) d'une réalité objective, que nous essayons de refléter, de comprendre et quelquefois aussi de modifier. Si Rosenfeld avait fait l'*expérience* de lire le texte d'Engels qu'il sollicite en vain et de prendre connaissance du livre de Lénine, il se serait aperçu que ce qu'il entend par matérialisme n'est rien d'autre que l'empirisme — et, qui plus est, un empirisme idéaliste, comme j'ai essayé de le montrer par ailleurs[16].

III. Heisenberg est-il matérialiste ?

Rosenfeld ne dit pas expressément que Bohr est matérialiste, bien qu'il affirme que sa théorie de la complémentarité est matérialiste ; il donne seulement à entendre qu'il l'est en constatant que Bohr « est trop subtil dialecticien pour tomber dans l'inconséquence d'Heisenberg » (p. 408). En quoi consiste cette inconséquence ? D'après notre auteur, Heisenberg est philosophiquement inconséquent parce qu'il soutient des opinions matérialistes en physique et dans la théorie de la connaissance, mais des opinions idéalistes dans d'autres domaines. Il se réfère à un article de Heisenberg[17] et remarque : « Le mot « *geistig* » qu'il répète avec insistance dans sa tirade finale n'a pas de

13. Lénine : *Matérialisme et Empiriocriticisme*, Editions Sociales 1948, p. 129.
14. *Ibid.*, p. 132.
15. *Ibid.*, pp. 133-134.
16. Voir *ouvr. cité* note 2.
17. Voir *ouvr. cité* note 5d.

signification épistémologique ; c'est le schibboleth d'une classe. L'idéalisme d'Heisenberg relève de la sociologie, non de la théorie de la connaissance » (p. 408).

Certes, Heisenberg est loin d'être extrêmement conséquent dans sa conception du monde, mais on peut difficilement comprendre en quoi ses idées concernant la théorie de la connaissance seraient inconciliables avec ses opinions politiques et sociales. Peut-être Rosenfeld confond-il à nouveau l'empirisme idéaliste avec le matérialisme. En effet, dans l'article même dont les idées philosophiques sont louées par Rosenfeld, nous trouvons, entre autres, les exemples suivants qui nous suggèrent que la théorie de la connaissance de Heisenberg n'est rien moins que matérialiste : tout d'abord Heisenberg s'en tient à la doctrine kantienne de l'espace, du temps et de la causalité, catégories qu'il considère comme « formes fondamentales de la faculté de représentation ou de la pensée humaines »[18] ; en second lieu il croit que la mécanique des quanta a détruit « l'illusion » d'une « description objective et causale des processus » et nous a surtout donné « une vue sur les possibilités »[19]. Ces exemples témoignent-ils du « plus pur esprit du matérialisme scientifique », comme l'affirme Rosenfeld ? (p. 408).

Ce ne sont pas là des preuves isolées de la thèse selon laquelle Heisenberg est idéaliste. Il n'est pas seulement partisan de l'idée de la complémentarité de Bohr, à laquelle il a consacré tout un livre remarquable[20], mais il a été l'un des premiers à introduire l'idéalisme subjectif de Berkeley dans l'interprétation même du formalisme mathématique de la théorie des quanta, formalisme que personne ne semblait avoir compris dès l'abord. C'est en effet Heisenberg[21] qui, le premier, introduisit dans la physique l'exigence positiviste de travailler exclusivement avec les grandeurs observables, c'est-à-dire avec des « grandeurs définies par des opérations », ou avec des concepts dont on croit fixer le contenu en termes de mesure, puisque, selon la philosophie de Berkeley, les objets et qualités qui n'ont pas encore été observés n'existent tout simplement pas : *être, c'est être mesuré*.

Cette exigence empirique de n'opérer qu'avec des grandeurs observables a une allure scientifique trompeuse, dans la mesure où elle rejette la recherche d'entités cachées — ce qui était raisonnable il y a quatre siècles, comme réaction contre le bavardage scolastique sur les

18. Heisenberg : *ouvr. cité* note 5d., p. 335.
19. *Ibid.*, p. 333.
20. Voir *ouvr. cité* note 5b.
21. Voir *ouvr. cité* note 5a.

formes substantielles cachées — et dans la mesure où elle met l'accent sur le côté indubitablement actif de la connaissance et surtout sur le rôle de l'expérimentation. Mais confondre opérationalisme et matérialisme, cela ne signifie rien d'autre que confondre l'affirmation matérialiste « seules peuvent être observées les choses qui ont une existence objective » avec la phrase positiviste « seul existe ce qui peut être observé ». Cette dernière formule est la racine gnoséologique de l'interprétation habituelle de la théorie des quanta : étant donné que la position et l'impulsion d'un électron ne peuvent être *observées* simultanément avec quelque précision, Heisenberg et Bohr concluent que l'électron ne *possède* ni position ni vitesse : il possède seulement la possibilité d'acquérir une position ou une vitesse lorsqu'un expérimentateur daigne le mesurer.

On a, à maintes reprises, affirmé que Heisenberg a créé sa mécanique des matrices en s'en tenant strictement au principe « opérationnel » mentionné ci-dessus. Cela ne semble pas historiquement exact, étant donné que l'interprétation physique du formalisme des matrices, élaborée d'après des axiomes positivistes, fut avancée un peu plus tard. Quoi qu'il en soit, dans un mémoire célèbre qu'il écrivit lorsqu'il était l'hôte de Bohr, Heisenberg a lui-même montré le caractère positiviste de sa propre interprétation de la mécanique des quanta et a affirmé que la mécanique des matrices est issue de la tentative d'établir des « relations entre nombres concrets fournis par l'expérience »[22].

Ainsi les termes « position d'un objet » n'ont de signification que dans la mesure où *nous* pouvons prescrire une expérience déterminée, destinée à mesurer une telle position[23], ce qui est justement une application du critère de véracité (*Bewährungskriterium*) dans le sens où l'entend le Cercle de Vienne. Heisenberg est même allé jusqu'à dire : « *La* « *trajectoire* » *ne provient que de ce que nous l'observons* »[24]. Que le formalisme mathématique ait été ou non formé selon la ligne opérationaliste, on peut reconnaître que son interprétation fut adapté à l'opérationalisme.

En considérant la possibilité de calculer la trajectoire de l'électron avant que quelques-unes de ses qualités mécaniques aient été me-

22. *Ibid.*, p. 172 : « La mécanique des quanta provenait justement de la tentative de rompre avec ces conceptions cinématiques habituelles (c'est-à-dire classiques) et de les remplacer par des relations entre nombres concrets fournis par l'expérience ».

23. *Ibid.*, p. 174.

24. *Ibid.* p. 185 (les guillemets sont de Heisenberg).

surées, Heisenberg affirme : « C'est donc une simple affaire de goût de savoir si l'on doit attribuer une réalité physique quelconque au calcul précité concernant le passé de l'électron » [25]. D'autres passages montrent que *son* goût personnel le pousse à croire a priori qu'un électron n'existe pas, tant qu'il n'est pas observé par quelqu'un [26].

Nous voulons cependant nous attacher surtout aux opinions de Heisenberg concernant la complémentarité : deux exemples suffiront pour montrer qu'elles ne sont rien moins que matérialistes. Voici le premier : « La question concernant la position exacte et l'impulsion exacte d'une particule est une fausse question, c'est-à-dire une question à laquelle il n'y a pas de réponse, parce qu'elle est mal posée » [27]. Comme d'habitude chez les positivistes, les problèmes les plus intéressants sont déclarés sans importance seulement parce que nous ne les avons pas encore résolus de façon satisfaisante [28].

Voici un second passage de philosophie positiviste : « Dans la conception du monde de la physique classique, le fondement solide de toute connaissance était la réalité objective dans l'espace et dans le temps d'événements se déroulant, tout à fait indépendamment de processus spirituels, selon les lois de la nature, lois qui, à leur tour, ne se rapportent qu'à de tels événements « objectifs » (...) La science contemporaine a finalement été contrainte, par la technique perfectionnée de l'observation et par l'enrichissement en connaissances positives qui en découle, à réviser ses fondements gnoséologiques et elle a dû se convaincre qu'il ne peut y avoir de semblable fondement solide de toute connaissance. La représentation d'un univers se déployant

25. *Ouvr. cité* note 5b, p. 20. Ce point a été analysé de façon pertinente par Viktor Stern dans *Erkenntnistheoretische Probleme der modernen Physik* (Berlin : Aufbau-Verlag 1952), pp. 77 sq.

26. L'opinion d'après laquelle l'électron n'est pas un objet matériel, mais une construction logique, s'est généralisée chez les auteurs de manuels et les philosophes. Deux exemples, choisis tout à fait au hasard : R.B. Lindsay et H. Margenau, *Foundations of Physics* (New York : John Wiley & Sons, 1936), p. 395 et G. Burniston Brown, *Science : Its Methods and Philosophy* (Londres : Allen & Unwin Ltd., 1950), p. 176. Ils sont incapables de distinguer l'électron comme *objet en soi* de l'électron tel que nous le connaissons, donc comme *objet pour nous*, qui ne coïncide jamais complètement avec le premier.

27. Heisenberg : *ouvr. cité* note 5c, p. 40.

28. Récemment la question de la position et de la vitesse simultanées et exactes de micro-objets a été résolue dans le cadre de la mécanique quantique non relativiste avec l'introduction de variables x (t) et p (x, t) qui, dans l'interprétation usuelle, seraient appelés paramètres cachés. Ces variables sont des nombres ordinaires ; elles commutent donc entre elles et ont par conséquent des valeurs définies simutanément. Voir David Bohm : « A suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of Hidden Variables », *The Physical Review*, t. 85, pp. 166-193 (1952). Cela semble être la principale cible de l'école conservatrice.

objectivement dans l'espace et dans le temps n'est, elle aussi, qu'une « idéalisation de la réalité », effectuée avec le désir d'objectiver autant que possible »[29].

Je pense que cela suffit à démontrer que les opinions gnoséologiques de Heisenberg sont idéalistes — bien qu'il accuse les matérialistes de procéder à « une idéalisation de la réalité » quand ils parlent d'un monde matériel qui n'a pas besoin des physiciens pour rester en mouvement.

IV. Bohr est-il matérialiste ?

A peu de choses près, Bohr a les mêmes opinions que Heisenberg sur la théorie de la connaissance. Les deux différences essentielles sont, premièrement que Bohr ne les exprime pas aussi ouvertement que Heisenberg : « Le maître dont l'oracle est à Delphes ne dit ni ne dissimule rien, il suggère seulement »[30] ; en second lieu, Bohr n'emploie pas souvent le mot *esprit*, que Rosenfeld considère comme signe particulier de l'idéalisme — bien que Bohr n'emploie évidemment pas non plus le mot *matière* — et il se réfère rarement au mot *réalité* sans le mettre entre guillemets et sans montrer les graves dangers résultant de l'emploi d'un tel mot — exemple qui est suivi par Heisenberg et d'autres physiciens.

Bohr aime à constater que l'interaction finie (c'est-à-dire qu'on ne peut faire tendre vers zéro) entre l'objet et le dispositif de mesure exige « une renonciation définitive à l'idéal classique de la causalité et une révision radicale de notre attitude vis-à-vis du problème de la réalité physique »[31]. Cette affirmation n'a pas d'autre fondement que la confusion systématique entre l'appareil de mesure, qui est une chose existant tout à fait objectivement, et le sujet, tel que l'entend la théorie de la connaissance[32]. Que cette « révision radicale » n'ait pas été provoquée par le quantum d'action, mais ne fasse que remplir une exigence de la philosophie positiviste, on en trouve une preuve dans les tentatives idéalistes de Bohr[33] et Rosenfeld (p. 397

29. Heisenberg, *ouvr. cité* note 5c, p. 86.
30. Héraclite : fragment 93.
31. Bohr : *ouvr. cité* note 4d, p. 697.
32. Ce point a été brillamment expliqué par Bela Fogarasi, *Deutsc[he] Zeitschrift für Philosophie*, 3-4, 1-1953, pp. 640-662 ; et de façon plus détaillée : *Kritik des physikalischen Idealismus*, Berlin 1954.
33. Voir *ouvr. cité* note 4b.

398) d'étendre les relations de complémentarité à la physique classique, où la constante de Planck n'intervient pas. Bien plus, Bohr a lui-même reconnu que l'abandon de la causalité est simplement la conséquence du fait que, dans l'interprétation habituelle de la théorie des quanta, « nous ne pouvons plus continuer à parler d'un comportement propre des objets physiques »[34].

Et Heisenberg a déclaré que « la division du monde en système de l'observateur et système de ce qui est observé empêche une formulation précise de la loi de cause et d'effet »[35]. Comme cela est habituel chez les positivistes, Bohr et Heisenberg identifient les objets et leur mode d'existence avec les *critères* qui établissent leur existence ; ils confondent le déterminisme avec les critères servant à le *vérifier*.

Si l'on désire une preuve supplémentaire du fait que la philosophie de Bohr est aussi idéaliste que celle de Heisenberg, on trouvera ci-après une phrase, dans laquelle le premier cite le second en l'approuvant : « On peut même dire, remarque-t-il (Heisenberg) ... que les phénomènes ordinaires (macroscopiques) sont en quelque sorte engendrés par des observations répétées »[36]. Rosenfeld connaît cette phrase, puisqu'il est un des traducteurs en français du livre dans lequel elle se trouve. Pourquoi alors (p. 405) le mot connu de Le Roy, « le savant crée le fait » — analogue à la déclaration citée plus haut —, lui déplaît-il ?

---

34. Bohr : Voir *ouvr. cité* note 4e, p. 298 : « La renonciation, à laquelle nous sommes contraints, à l'idéal de la causalité dans la physique atomique est conceptuellement fondée par le seul fait que, par suite de l'interaction inévitable entre les objets de l'expérimentation et les instruments de mesure — interaction qui ne peut, par principe, être prise en considération, si les instruments doivent permettre utilement l'application non équivoque des concepts nécessaires à la description des expériences —, nous ne sommes plus en mesure de parler d'un comportement indépendant des objets physiques ». De la même façon, Bohr a soutenu dans d'autres articles que l'indétermination doit être rapportée à l'interaction de l'objet et du sujet ; par exemple : « Atomic Stability an Conservation Laws », dans *Convegno di Fisica Nucleare* (Roma, Reale Accademia d'Italia, 1952), pp. 119-130.

35. Heisenberg : *ouvr. cité* note 5b, p. 58. Il faut remarquer que ce qu'Heisenberg a en vue n'est pas la *valabilité objective* d'une forme de déterminisme, mais la possibilité *de le vérifier expérimentalement*, ce qui est la chose qui compte pour le positivisme. Le nœud de l'argumentation est qu'à l'échelon atomique il n'existe pas de lien direct entre deux faits donnés, mais qu'une telle liaison passe par un observateur, qui est à son tour entièrement indépendant des événements. C'est pourquoi les théoriciens de la complémentarité disent qu'il faut renoncer à toute forme de déterminisme, car il est impossible de mesurer simultanément avec la précision voulue toutes les variables nécessaires pour prédire le développement futur d'une situation.

36. Bohr : *ouvr. cité* note 4a, p. 64.

Il semble clair que notre examen de la théorie de la connaissance de Heisenberg (ci-dessus § III) vaut pour Bohr, étant donné que les deux points de vue sont essentiellement idéalistes. Ils appartiennent évidemment à un genre raffiné de l'idéalisme, un genre qui n'a pas besoin de faire appel à l'*esprit* à tout bout de champ : c'est là, en un mot, la variante néo-positiviste de l'idéalisme. Dans la mesure où l'on peut attribuer à Bohr une attitude philosophique déterminée, on peut, d'une façon générale, le caractériser comme positiviste, jamais comme une sorte de matérialiste dialecticien, comme Rosenfeld le voudrait.

Non seulement sa doctrine de la complémentarité est essentiellement positiviste, mais ses écrits sont également pleins d'autres idées positivistes, telle sa définition du phénomène physique [37], son exagération du rôle de l'observateur [38] et de l'importance du langage [39], sa conception pragmatique de la physique comme « schéma purement symbolique ne permettant que des prédictions » [40], etc.

Cela devrait certes suffire, mais il existe encore des faits plus simples. La séance inaugurale du second Congrès positiviste pour l'Unité de la Science se tint en 1936 dans la maison de Bohr. Il y fut nommé membre du comité international de ce mouvement, qui donna naissance bientôt après à *l'International Encyclopedia of Unified Science*, au comité consultatif de laquelle il appartient. Au cours de ce congrès, qui fut consacré au problème de la causalité, Bohr fit un rapport sur la complémentarité [41] dans le plus pur esprit positiviste, de sorte qu'il fut ensuite chaleureusement recommandé dans une conférence de Philipp Frank [42], qui faisait alors figure de chef de l'école néo-positiviste. Frank déclara dans sa conférence que le point de départ de la formulation correcte (c'est-à-dire positiviste) de la complémentarité était l'article de Bohr [43] répondant aux critiques d'Einstein, Podolsky et Rosen [44], critiques qui constituaient en réalité

37. Voir Bohr : *ouvr. cités* notes 4f, 4h, 4i.
38. Voir Bohr : *ouvr. cités* notes 4a, 4b, 4d, 4e.
39. Voir Bohr : *ouvr. cités* notes 4g, 4i.
40. Bohr : *ouvr. cité* note 4i, p. 210.
41. Voir *ouvr. cité* note 4e.
42. Philipp Frank : « Philosophische Deutungen und Missdeutungen der Quantentheorie », *Erkenntnis*, tome 6, p. 303 (1936). Voir également *Interpretations and Misinterpretations of modern Physics* (Paris : Hermann, 1938).
43. Voir Bohr : *ouvr. cité* note 4d.
44. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen : *The Physical Review*, tome 47, p. 777 (1935). Voir également Einstein : « Autobiographical notes » et « Reply to Criticisms », dans l'ouvrage indiqué dans la note 4i.

une réaction saine — sinon tout à fait juste — contre l'idéalisme de l'école de Copenhague. Frank soutint sans réserve toutes les idées de Bohr, y compris l'extension — totalement dépourvue de fondement — de la complémentarité à des domaines de recherche autres que la physique. Lors de cette rencontre, personne ne s'éleva contre la conférence de Bohr ni contre la présentation de la complémentarité sous l'uniforme positiviste officiel par Frank. De plus, la complémentarité fut plus ou moins explicitement déclarée doctrine officielle de l'empirisme logique et on dissipa les derniers doutes que nourrissaient encore quelques disciples. Cela fut constaté par Frank dans la conclusion officielle : « Il a parfois été affirmé qu'il existait une certaine divergence entre la conception de l'empirisme logique et la conception de Bohr de la théorie des quanta. Je crois que ce congrès a clairement montré qu'il n'en est rien. Bohr a très clairement fait ressortir dans sa conférence que sa conception n'a rien de commun avec une philosophie métaphysique de la nature »[45].

Depuis lors, l'interprétation de Bohr et Heisenberg de la théorie des quanta fut considérée comme doctrine officielle de l'empirisme logique et elle fut tout récemment exposée comme telle dans l'*International Encyclopedia of Unified Science*[46], bien que quelques positivistes se trouvant un peu à l'écart, comme par exemple Reichenbach, aient préféré leurs mauvaises interprétations propres. D'autre part, Bohr est considéré personnellement comme plus ou moins étroitement lié à l'école de l'empirisme logique, fait bien connu que Rosenfeld passe sous silence dans son désir de présenter Bohr comme dialecticien. Un autre fait qui ne peut être caché est que Bohr[47] a explicitement repoussé les « extrêmes du matérialisme et du mysticisme » dans son éloge de l'encyclopédie positiviste.

Mais il ne serait pas tout à fait exact d'affirmer que Bohr soit un positiviste conséquent. Si curieux que cela paraisse, il a différents points communs avec l'existentialisme. Il semble en effet que Bohr

45. Ph. Frank : « Schlusswort », *Erkenntnis*, tome 6, p. 445 (1936). Une reconnaissance antérieure du caractère positiviste de l'interprétation orthodoxe de la théorie des quanta se trouve dans P. Jordan : « Ueber den positivistischen Begriff der Wirklichkeit », *Die Naturwissenschaften*, tome 22, pp. 485-490 (1934).

46. Ph. Frank : « Foundations of Physics », dans *International Encyclopedia of Unified Science*, tome I, n° 7 (Chicago : University of Chicago Press, 1946).

47. Bohr : « Analysis and Synthesis in Science », dans *International Encyclopedia of Unified Science*, tome I, n° 1 (Chicago : Chicago University Press, 1938).

partage les thèses fondamentales suivantes de son compatriote brumeux, Sören Kierkegaard, le fondateur de l'existentialisme moderne :

1° Tout est divisé en deux termes s'excluant mutuellement.

2° Les contradictions sont tellement irréductibles, les oppositions si fortes, les paradoxes tellement insolubles, qu'aucune pensée humaine ne peut réunir par synthèse les pôles opposés en unités supérieures.

3° Il n'y a pas de continuité, les bonds sont irréductibles.

4° Il n'y a pas de certitude.

5° La vérité n'est pas l'adéquation du sujet à l'objet, mais elle réside dans la subjectivité.

6° La vérité est toujours paradoxale, car elle est reliée à l'irréductibilité des dyades et à l'irrationalité de l'existence.

Evidemment, il existe des différences entre la « dialectique de la complémentarité » de Bohr et la « dialectique qualitative » de Kierkegaard. C'est ainsi que Kierkegaard — d'ailleurs un des écrivains les plus insignifiants de tous les temps — s'intéressait avant tout à l'existence humaine et à la religion, tandis que Niels Bohr, un des plus grands physiciens de notre époque, s'intéresse principalement à la microphysique. Cependant, il ne faudrait pas sous-estimer la parenté entre eux. Weizsäcker[48], qui est familiarisé avec l'existentialisme aussi bien qu'avec l'interprétation officielle de la théorie des quanta, et Szilasi[49], le professeur existentialiste, ont également vu cette parenté. Rosenfeld ne réussira probablement pas à les convaincre que Bohr est matérialiste.

V. La complémentarité : principe physique ou doctrine philosophique ?

L'idée de la complémentarité a souvent été décrite comme dialectique. Bohr lui-même a employé le mot *dialectique* en liaison avec le problème ondes-corpuscules et son ancien élève Rosenfeld affirme que la doctrine de la complémentarité est dialectique, tandis que les

48. C. F. von Weizsäcker : « Beziehungen der Theoretischen Physik zum Denken Heideggers », dans *Martin Heideggers Einfluss auf die Wissenschaft* (Bern : Francke, 1949). Voir également son *Le Monde vu par la physique* (Paris : Flammarion 1956).

49. Wilhelm Szilasi : *Wissenschaft als Philosophie* (Zurich : Europa-Verlag, 1945).

nouvelles interprétations matérialistes de la théorie des quanta — comme par exemple celle de Bohm — seraient mécanistes. Examinons ses affirmations ; mais, avant de le faire, nous devrions voir clair en ce qui concerne la position de ce qu'on appelle le principe de complémentarité, c'est-à-dire que nous devrions savoir s'il appartient à la physique ou à la philosophie.

Un des arguments de Rosenfeld en faveur de l'idée de complémentarité est qu'elle ne serait qu'un simple compte rendu des *faits* : « Bohr répète souvent, avec son sourire modeste, que l'idée de complémentarité n'exprime somme toute que des rapports parfaitement évidents » (p. 394). L'inventeur de la complémentarité a cependant essayé dès le début d'étendre cette doctrine à la biologie [50], à la psychologie et dernièrement même à la sociologie [51], ce qui prouve qu'il ne la considère ni comme un simple compte rendu des faits, ni comme une hypothèse strictement physique, mais comme une hypothèse philosophique très générale. En effet, l'idée de la complémentarité appartient à deux domaines de la philosophie :

a) dans la mesure où on la propose comme remplaçant moderne du « déterminisme démodé », on pourrait considérer la théorie de la complémentarité comme doctrine ontologique, si ce n'était qu'elle concerne, non des choses en soi, mais des observations;

b) dans la mesure où elle doit éclairer les relations et les limites des descriptions « conjuguées » ou « complémentaires » de toutes sortes dans tous les domaines de la recherche, l'idée de la complémentarité appartient à la méthodologie.

Il sera instructif de se rappeler à ce propos une des nombreuses déclarations de Bohr : « La leçon épistémologique que nous avons reçue du récent développement de la science physique, où les problèmes permettent une formulation relativement concise des principes, peut également suggérer des méthodes d'approche dans d'autres domaines scientifiques, où la situation est d'un caractère essentiellement moins accessible. Un exemple est fourni par la biologie, où des arguments mécaniques et vitalistes sont utilisés d'une façon typiquement complémentaire. En sociologie également, une telle dialectique peut souvent être utile, en particulier dans les problèmes que nous rencontrons dans l'étude et la comparaison de cultures humaines, où nous devons faire

50. Voir Bohr : *ouvr. cité* note 4c.
51. Voir Bohr : *ouvr. cité* note 4h.

face à l'élément de suffisance inhérent à toute culture nationale et qui se manifeste par des préjugés qui ne peuvent évidemment pas être appréciés du point de vue des autres nations »[52].

Il est important d'avoir présent à l'esprit le caractère philosophique de la théorie de la complémentarité, le fait qu'elle n'est pas une conception scientifique, « qui s'impose à nous avec une nécessité logique » (p. 394) (comme si c'était un axiome !). Car c'est un procédé favori de quelques idéalistes contemporains que de représenter leurs doctrines comme des résultats scientifiques nécessaires, alors qu'elles sont en réalité des prémices, qui sont introduites ou bien *de l'extérieur* ou tout au début (surtout dans l'interprétation physique de formules mathématiques)[53].

Bohr lui-même se rend très bien compte de la nature gnoséologique de son idée favorite. Dans sa dernière analyse[54], il dit que le mot complémentarité ne nous sert qu'à nous rappeler « la situation gnoséologique entièrement nouvelle » (« *gänzlich neue erkenntnistheoretische Situation* ») en physique. Et, comme nous l'avons vu, pas seulement en physique, mais dans toutes les sciences, puisque la complémentarité est considérée comme la règle d'or pour éviter des pseudo-problèmes (« *inhaltlose Streitfragen* ») dans toutes les sciences[55] ; c'est là la contribution principale de Bohr au mouvement positiviste de la « Science Unifiée » auquel il appartient.

C'est pourquoi la complémentarité, loin d'être un *résultat* nécessaire de la mécanique quantique, est une hypothèse superflue, surajoutée. Examinons maintenant si l'effort de Bohr en vue d'étendre l'idée de la complémentarité à tous les domaines des sciences de la nature est réellement justifié par le fait que les rapports de complémentarité ne sont autre chose que des rapports dialectiques, comme le dit Rosenfeld (p. 408).

---

52. Bohr : *ouvr. cité* note 4h, pp. 317-318.

53. Un exemple parmi beaucoup d'autres est l'interprétation habituelle de l'équation des valeurs propres $Au_i = a_i u_i$ dans laquelle A ne doit pas représenter une propriété de l'objet, mais quelque chose qui est mesuré (c'est-à-dire une *grandeur observable*) et dans laquelle les nombres a_i ne sont pas considérés comme des valeurs que peut prendre la variable dynamique A, mais comme résultats possibles de la mesure de la grandeur « observable » A. Ainsi on abandonne *dès le début* le plan de l'être et tout se passe sur le plan de l'expérience, sans aucune référence à des choses ayant une existence objective.

54. Bohr : *ouvr. cité* note 4e, p. 298.

55. *Ibid.*, pp. 293 et 301.

VI. La complémentarité est-elle dialectique ?

Rosenfeld ne donne pas de démonstration de son affirmation selon laquelle la complémentarité serait dialectique. Il la tient pour établie, croyant que c'est à cause de sa nouveauté et du manque d'entraînement dialectique qu'on se refuse à accepter la complémentarité : « Si on essaie d'analyser les causes de ces résistances, on verra qu'elles se ramènent à un trait commun : la méconnaissance du mouvement dialectique de la pensée scientifique » (p. 394). Il faut dire que Rosenfeld n'essaie pas d'analyser ces causes ; il ne fait qu'exposer son opinion, dans la manière dogmatique de son école. Il y a quelque chose qui ne va pas dans cette opinion ; cela est suggéré par le fait que la théorie de la complémentarité est accueillie avec enthousiasme par toutes sortes d'ennemis de la dialectique, tandis que la plupart des dialecticiens ont finalement admis la nature non dialectique de cette idée. Mais cela n'est évidemment pas une preuve suffisante ; c'est pourquoi nous voulons tenter d'esquisser l'analyse dont Rosenfeld s'est dispensé.

Rappelons-nous d'abord que, puisque la complémentarité ne se rapporte pas à la polarité de ce qui existe matériellement, mais seulement à des images ou concepts « conjugués », comme nous l'avons vu dans la première partie et comme Rosenfeld lui-même l'explique (p. 395), nous ne pouvons, dans le meilleur des cas, avoir affaire qu'à une doctrine *logique*, qui traite d'une sorte de liaison entre des concepts déterminés ; ce n'est donc pas une théorie physique, car la tâche de la physique théorique n'est pas d'analyser des concepts, mais d'exprimer les choses par des concepts. Le fait que la complémentarité ne se rapporte pas au monde extérieur a été souligné par Bohr [56] et encore plus clairement par Frank [57], qui a montré qu'en usant systématiquement de la terminologie de Bohr on évite de tomber dans une « conception métaphysique de la complémentarité physique ». « Car il est clair ici que l'on ne dit rien d'un « monde réel », ni de sa nature, de sa cognoscibilité ou de son caractère indéterminé ». « Mais il apparaît tout de suite des phrases métaphysiques dépourvues de sens lorsqu'on dit que la « réalité » elle-même est « divisée » ou pré-

56. Voir Bohr : *ouvr. cité* note 4e.
57. Voir Ph. Frank : *ouvr. cité* note 42, p. 309.

sente des « aspects divers »[58], ce qui est exactement ce qu'écrivait Bohr[59]. Donc, même si l'on suppose que la complémentarité est dialectique, il est clair qu'elle ne concerne pas directement des objets physiques, tels qu'ondes ou particules, mais seulement des concepts auxquels on ne fait rien correspondre de matériel.

Il est également clair que la théorie de la complémentarité n'appartient pas à la science des contradictions, c'est-à-dire à la dialectique. Bohr lui-même a répété inlassablement que l'idée de complémentarité est exactement l'inverse de celle de contradiction, puisqu'elle a pour but d'*éviter* des contradictions entre modèles « apparemment contradictoires »[59 bis]. Jordan, qui a défendu un horrible mélange de mécanique quantique, de positivisme, de religion et de nazisme, comprend très bien que la théorie de la complémentarité — qu'il considère comme « le résultat le plus important qui se soit dégagé de la physique moderne pour la philosophie » — est un moyen pour liquider les « contradictions, apparemment désespérées, que nous avons rencontrées d'abord dans le dualisme des ondes et des corpuscules »[60]. Et il énonce avec une grande netteté ce que l'on peut trouver dans presque tous les manuels de mécanique quantique — à savoir que deux propriétés sont dites *complémentaires* l'une de l'autre « en ce sens qu'elles ne se présentent jamais en même temps dans une même expérience (et ainsi n'entrent jamais en opposition directe, effective) »[61].

Quel genre d'interaction dialectique peut-il exister entre deux termes qui n'entrent jamais en contact ; que l'on ne regarde pas comme *contraires*, mais comme *complémentaires*, dans le même sens que des angles ou des couleurs sont complémentaires ; dont on ne considère pas qu'ils apparaissent lors de la division d'une unité et se pénètrent pour se fondre dans un concept supérieur ? La théorie de la complémentarité se réfère bien à deux pôles, mais elle ne fait que constater la polarité, elle met les pôles l'un en face de l'autre, dans

58. « Denn hier ist es klar, dass über eine « reale Welt » nichts ausgesagt wird, weder über ihre Beschaffenheit, noch über ihre Erkennbarkeit, noch über ihre Unbestimmtheit... Es entstehen aber sofort sinnlose metaphysische Sätze, wenn man davon spricht, dass die « Realität » selbst « zwiespältig » ist oder « verschiedene Aspekte » aufweisst. ». Ph. Frank : *ibid.*, p. 310.

59. Voir Bohr : *ouvr. cité* note 4b, p. 370.

59 bis. Voir Bohr : *ouvr. cité* note 4e, pp. 295, 297-299.

60. Pasqual Jordan : *Physics of the 20th century*, traduit par E. Oshry (New York : The philosophical library, 1944), p. 131.

61. *Ibid.*, p. 132.

ı manière typiquement « métaphysique » (au sens où Hegel et Engels mploient ce mot), elle ne permet pas leur conflit et encore moins eur synthèse. Une dialectique sans contradiction — dans le sens onologique du mot contradiction [61 bis] — et sans synthèse, c'est vraiment ne étrange dialectique !

Comme nous l'avons vu, la complémentarité est prônée comme levant remplacer la causalité et en général comme devant remplacer ussi bien le déterminisme que l'indéterminisme. Bohr écrit que « le oint de vue de la complémentarité peut être considéré comme une *énéralisation* rationnelle de l'idéal même de la causalité » [62]. D'aure part, Rosenfeld (p. 399) considère la théorie de la complémenarité comme une *limitation* du déterminisme. Ce n'est pas à moi de nettre de l'ordre dans l'embrouillamini du parti des complémentaistes, mais je dois parler de l'affirmation de Rosenfeld, d'après laquelle la limitation en question serait une négation au sens dialecique. Car on nous dit effectivement que « nous saisissons ici d'une manière particulièrement nette le déroulement d'un mouvement dialectique selon le schéma classique. L'impossibilité de faire rentrer le quantum d'action dans le cadre des lois déterministes de la physique classique correspond à la phase de « négation » ; *la négation dialectique consiste en effet*, comme l'observe Engels, *à reconnaître l'existence d'une limitation à la validité d'un concept* : en l'occurence, le concept du déterminisme classique. Cette phase, dominée par les contradictions de l'ancienne théorie des quanta, aboutit à la formulation et à l'interprétation de la mécanique quantique dans le cadre de la complémentarité : c'est la « synthèse » où ces contradictions s'évanouissent pour faire place à une harmonie nouvelle » (p. 399 ; souligné par moi *M.B.*).

Admettons que la théorie des quanta ait suivi un processus qui ressemble à celui décrit ici. Mais ce qui ne peut guère être admis, c'est la signification que Rosenfeld attribue aux deux mots-clés, à savoir

---

61 bis. Il n'est pas nécessaire de répéter que les dialecticiens ne dé-
fendent pas l'emploi de *phrases* contradictoires mais l'analyse des « con-
tradictions » de l'être, c'est-à-dire de la mise à jour des forces, directions,
aspects contradictoires dans les objets de la nature et de la société et dans
les *systèmes* d'objets idéels, mais non pas dans chaque objet idéel, celui-
ci devant être en harmonie avec lui-même. (Si tous les objets idéels étaient
déchirés par des contradictions internes, ils pourraient être doués d'un
mouvement propre, donc d'une existence autonome, ce qui, selon le ma-
térialisme, n'est pas le cas). Par exemple, des phrases concernant des
contradictions doivent être dans leur propre expression dépourvues de
contradictions, bien que des contradictions avec *d'autres* phrases (contra-
dictions extérieures) puissent toujours être découvertes.

62. Bohr : *ouvr. cité* note 4i, p. 211 (souligné par moi *M.B.*).

« négation » et « synthèse ». Il est vrai que la mécanique quantique a nié dialectiquement la mécanique classique. Pas seulement parce que la première a montré les limites de la seconde, mais parce qu'elle l'a portée (*aufgehoben*) à un niveau supérieur. Pour créer la mécanique quantique, il ne suffisait pas de découvrir les limitations de la mécanique et de l'électrodynamique classique ; ces limitations ont entraîné la recherche d'une théorie plus profonde et plus large ; elles ont été les conditions nécessaires, mais non suffisantes, de la naissance de nouvelles théories, tout comme les limitations des actuelles théories poussent les savants à construire de nouvelles théories, bien qu'elles ne puissent pas les produire elles-mêmes. C'est un trait général du développement des concepts et des idées : aussi souvent que leur contenu, leur « compréhension » se modifie, l'extension ou le domaine d'application correspondant se modifient également et inversement; par exemple, l'extension peut être limitée, mais elle peut également être élargie. En aucun cas ce n'est uniquement une question d'extension, et encore moins de diminution graduelle de l'extension, comme le pense Rosenfeld : ici, comme dans d'autres domaines, le contenu et la forme dépendent l'un de l'autre.

VII. Négation et synthèse

Comme nous l'avons vu, Rosenfeld affirme qu'Engels était d'avis que la négation dialectique *consiste* à reconnaître une *limitation* de la validité de *concepts*. Il cite Engels dans la question de la dialectique de façon aussi fausse qu'il le présente dans la question du matérialisme (voir § III). D'abord, la limitation qu'avait en vue Spinoza et qui fit l'objet des commentaires d'Engels [63] ne se rapporte pas à l'extension et encore moins à la validité ou à la *vérité* des concepts. Elle se réfère à la détermination (*Bestimmung*) logique ou définition du sujet logique selon ses attributs. Le célèbre *omnis determinatio est negatio* de Spinoza, que cite Engels et auquel Rosenfeld pense sans doute, signifie seulement ceci : la définition d'un concept n'est pas seulement positive (par l'énumération expresse des attributs d'un sujet dans le cas d'une proposition comportant prédicat et attributs) mais également

63. Voir Engels : *Anti-Dühring*, Editions Sociales 1950. p. 172 : « Spinoza dit déjà : *Omnis determinatio est negatio*, toute limitation ou détermination est en même temps une négation ».

négative, puisqu'elle a pour conséquence la constatation de toutes les caractéristiques qui n'appartiennent pas au concept. Par exemple, le simple jugement *S est P* entraîne un nombre indéterminé de jugements indéfinis de la forme *S n'est pas* Q, Q désignant la classe de tous les attributs qui se distinguent de *P* dans le domaine considéré. C'est un simple truisme que de dire que l'affirmation de quelque chose inclut la négation d'autre chose.

En second lieu, Marx et Engels ne considèrent pas la négation seulement comme une démarche de pensée se rapportant à des concepts et à des idées, comme le fait Rosenfeld, mais aussi comme la représentation imagée d'un mode de mouvement *matériel*, comme un stade dans le développement de processus matériels et comme un aspect de ce qui existe matériellement [64].

L'étrange théorie qui considère le progrès comme une série de limitations successives est une illustration de la vieille manie limitatrice du positivisme, que Rosenfeld semble partager lorsqu'il vante la simple limitation comme force motrice du progrès et lorsqu'il écrit [65] que les physiciens ont tout à fait raison quand ils présentent la stabilité atomique comme inconcevable et les transmutations atomiques comme inanalysables. C'est également l'opinion de Bohr sur le progrès [66]. D'après cela, nous ne progressons pas par l'approfondissement du savoir existant et par de nouvelles acquisitions (par exemple par l'enrichissement du contenu de nos concepts et la création de nouveaux concepts), mais par une limitation constante de notre savoir existant, c'est-à-dire par un simple rétrécissement de nos concepts. Il est difficile de voir quel rapport tout ceci a avec la dialectique.

En ce qui concerne la synthèse dialectique, il est vrai que l'actuelle théorie des quanta est une de ces synthèses ; mais — comme le montrent les fissures qui y apparaissent — ce n'est pas une synthèse ultime, dans laquelle toutes les contradictions ont disparu ; elle est aussi passagère que d'autres synthèses — bien qu'il y ait encore des physiciens qui parlent de la « théorie ultime de la matière » [67] que sera la prochaine théorie qui réussira. Dans une synthèse, les anciennes contradictions ont cessé d'exister, mais il en naît de nou-

---

64. Voir Engels : *ibid.*, pp. 161-173 et *Dialectique de la Nature*. Editions Sociales 1952, pp. 69-70.

65. L. Rosenfeld : « L'évolution de l'idée de causalité », *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège*, 4me série, tome 6, pp. 59-87 (1942).

66. Voir Bohr : *ouvr. cité* note 4c, p. 250.

67. Voir par exemple C.W. Heisenberg : *Two Lectures* (Cambridge; University Press, 1949), pp. 20 et 22.

velles ; dans le cas de théories, ces contradictions — nécessaires pour qu'il y ait des modifications ultérieures — ne sont pas, en général, des contradictions internes (sinon de telles théories seraient fausses), mais externes. C'est-à-dire que des contradictions naissent de la théorie en question et d'autres objets, idéels ou matériels. Par exemple, on peut découvrir que l'ancienne correspondance (*Entsprechung*) entre des objets physiques et leurs copies théoriques se transforme en une contradiction (*Widersprechung*) partielle. C'est le point que les théoriciens de la complémentarité se refusent à envisager, étant donné qu'ils s'efforcent uniquement de préserver de la rouille du temps l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique. C'est pourquoi Rosenfeld (p. 399) décrit la synthèse dialectique comme une « harmonie » et c'est pourquoi il affirme que la « théorie future » (*sic*), loin de nier dialectiquement la théorie de la complémentarité, « renforcera la complémentarité, en lui marquant sa place dans une synthèse plus vaste encore » (p. 409).

Bref, Rosenfeld peut confondre complémentarité et dialectique parce qu'il n'atteint pas le noyau de la dialectique, à savoir la loi de la lutte et de l'interpénétration des contraires, et parce qu'il considère la négation dialectique comme une simple réduction de l'extension des concepts et la synthèse dialectique comme une harmonie de l'équilibre.

VIII. Bohr est-il dialecticien ?

Rosenfeld ne souhaite pas seulement présenter la doctrine de la complémentarité comme une sorte de base moderne du matérialisme dialectique, mais il fait également de Bohr une sorte de matérialiste dialecticien spontané. Il affirme que Bohr est un « dialecticien subtil » et qu' « il est bien naturel que les rapports dialectiques prennent dans son esprit la forme et l'expression de rapports de complémentarité » (p. 408). Il est intéressant de savoir ce qu'en pense Bohr lui-même.

Dans la première de ses réponses célèbres aux critiques d'Einstein, Bohr affirmait[68] que, dans son article, « l'accent principal était mis sur l'aspect dialectique de la question ». La question était de savoir si la mécanique quantique donnait une description *complète*

68. Voir *ouvr. cité* note 4d, p. 702.

de la réalité — question à laquelle aucun dialecticien ne répondrait jamais de façon positive, comme Bohr le fit cependant. Il est difficile de déterminer ce que Bohr entend par dialectique ; autant que je sache, il n'a jamais fait allusion à la signification qu'il attribue à ce terme. Cependant deux points peuvent être constatés : premièrement, Bohr — comme tout autre penseur productif, et il en est un au suprême degré — pense souvent en dialecticien, sans le savoir lui-même ; il a même des moments de pensée dialectique consciente, comme par exemple lorsqu'il fait référence à l'opposition entre la forme et le contenu[69]. En second lieu, il est également clair que sa philosophie consciente est aussi anti-dialectique que la « dialectique » personnelle du professeur Rosenfeld.

Le second point sera facilement démontré avec l'aide de Rosenfeld. Celui-ci soutient que « le rapport de complémentarité est le premier exemple de schéma dialectique exact dont la structure formelle ait été correctement analysée par le logicien » (p. 408) ; suit une référence à un livre de Paulette Destouches-Février. Laissons de côté l'exactitude historique (Hegel n'était-il pas logicien ?) et entendons le témoin cité par Rosenfeld en sa qualité d'auteur d'un « intéressant ouvrage » dans lequel serait analysée une telle structure formelle.

Mme Destouches-Février est une représentante connue de la conception idéaliste et indéterministe de la mécanique quantique. Elle a fait[70], en commun avec J.-L. Destouches[71], des prédictions étranges au sujet du développement futur de la mécanique quantique. Tous deux ont affirmé que toute théorie future des phénomènes atomiques doit être *a*) une mécanique ondulatoire, *b*) subjectiviste et c) indéterministe. Avec Reichenbach et d'autres positivistes, Mme Destouches-Février a préconisé l'emploi de la logique trivalente pour comprendre la complémentarité ; mais, malheureusement pour elle et ses admirateurs, Bohr lui-même a expressément rejeté ce point central de son système[72], fait que Rosenfeld oublie de mentionner.

Mais il nous reste une possibilité d'apprendre ce que Bohr — ou,

---

69. Voir *ouvr. cité* note 4i, p. 240.

70. P. Destouches-Février : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, tome 220, 553 (1945) ; 233, 1430 (1951) ; *Journal de Physique et Le Radium*, 13, 210 (1952) ; *Proceedings of the XIth International Congress of Philosophy* (Bruxelles, 1953) (Amsterdam North-Holland publishing Co., 1953), tome VI, p. 78.

71. Voir par exemple : J.-L. Destouches : « Retour sur le passé », dans le recueil cité note 1.

72. Bohr : *ouvr. cité* note 4h, p. 317.

en tout cas, Rosenfeld — entend par dialectique. Dans ce but, nous allons regarder de plus près un des articles les plus connus du témoin de Rosenfeld. Elle y traite du « rapprochement dialectique » des théories, rapprochement qui « s'appuie essentiellement sur la complémentarité, c'est-à-dire sur la nécessité de considérer simultanément et de concilier des théories qui sous un certain angle paraissent contradictoires [73] ». C'est-à-dire qu'elle traite d'une « dialectique » des théories, non d'une dialectique qui s'applique à une large classe d'objets, matériels ou idéels ; dans sa « dialectique », les contradictions ne sont qu'apparentes et non réelles, tandis que les solutions ne sont que des conciliations et non pas des synthèses ou des dépassements. Est-il nécessaire de montrer que tout cela n'a rien à voir ni avec la dialectique de Hegel ni avec la dialectique matérialiste ? Mme Destouches-Février serait la dernière à vouloir créer une aussi dangereuse confusion. Elle écrit que « c'est par la complémentarité qui la fonde que cette dialectique (c'est-à-dire la sienne) diffère essentiellement d'une dialectique de type hégélien par exemple ». Plus loin, elle donne la preuve que sa dialectique n'a rien non plus à voir avec le matérialisme. « La nature ne présente autre chose que des événements positifs, des manifestations qui ne sont que l'affirmation d'elles-mêmes, sans lien avec leurs contradictions ailleurs que dans les représentations que nous en avons » [74]. Négation et contradiction sont, d'après elle, « des catégories purement mentales »[75] ; « il n'existe dans les faits aucune réalisation de l'idée de contradiction » [76]. Elle ne manque même pas de rejeter ici expressément le matérialisme dialectique [77]. Mais quelle est donc cette dialectique fondée sur la complémentarité ? Contrairement à la dialectique authentique, elle est « le type même de la dialectique entièrement positive (*sic*), elle ne comporte aucun élément négatif, et il suffit de se reporter au texte même de Bohr pour voir qu'elle se distingue essentiellement d'une association d'éléments contradictoires » [78]. Cette fois, nous sommes d'accord.

Acceptons l'invitation du témoin du professeur Rosenfeld et jetons un regard sur le texte de Bohr, pour en avoir le cœur net. La pola-

73. P. Destouches-Février : « Manifestations et sens de la notion de complémentarité », *Dialectica*, tome 2, pp. 383-411 (1948). Dans son livre *La structure des théories physiques* (1952), elle prend la même position en ce qui concerne la complémentarité.
74. *Ibid.*, p. 405.
75. *Ibid.*, p. 407.
76. *Ibid.*, p. 408.
77. *Ibid.*, p. 407.
78. *Ibid.*, p. 409.

rité onde-corpuscule, dit Bohr, n'est ni un fait physique ni une contradiction, mais seulement une question de « conceptions complémentaires »[79]. Ces concepts ne sont contradictoires qu'en apparence[80] et le mode complémentariste de description a précisément pour but d'éviter les contradictions[81], non de les décrire ou de les expliquer; de plus, la théorie de la complémentarité est la seule voie pour éviter les « contradictions apparentes »[82]. Nous voyons donc à nouveau que la théorie de la complémentarité n'est pas une doctrine dialectique[83].

IX. Qu'est-ce que le mécanisme ?

Rosenfeld accuse Lénine (p. 401) de confondre le matérialisme scientifique avec le matérialisme mécaniste et sa conception métaphysique du déterminisme[84]. Cela est vraiment comique, lorsque l'on pense que Rosenfeld préconise un affreux amalgame de mécanisme, d'irrationalisme, d'idéalisme, de positivisme et de terminologie maté-

79. Bohr : *ouvr. cité* notes 4a, p. 53 et 4b, p. 370.
80. Bohr : *ouvr. cité* note 4e, pp. 295 et 297.
81. *Ibid.*, p. 298.
82. *Ibid.*, p. 299.
83. Il faut remarquer que la question de savoir si les relations entre variables « conjuguées » (comme par exemple, position et impulsion) sont des relations dialectiques ou non, est quelque chose d'autre; jusqu'à présent, personne n'a démontré qu'elles l'étaient.
84. Qu'il me soit permis de remarquer ce qui suit. D'abord, Rosenfeld n'a probablement jamais vu une édition de la réfutation *avant la lettre* par Lénine de son opinion, à savoir du positivisme; il désigne en effet *Matérialisme et Empiriocriticisme* par les termes de « pamphlet politico-philosophique », alors que même la police occidentale sait que c'est un assez gros livre. En second lieu, notre critique, qui cite et comprend Engels à faux, se considère en droit d'affirmer que Lénine ne suivait pas Engels. En troisième lieu, il recommande le livre d'Anton Pannekoek, *Lenin als Philosoph* (New York 1948), une violente diatribe anti-léniniste et anti-soviétique, comme « analyse remarquable et trop peu connue des idées de Lénine ». L'auteur de ce pamphlet (dont la première édition, en allemand, est de 1938) jugeait que « les principes de Mach s'avéraient les meilleurs guides pour résoudre les difficultés » dans la physique du siècle présent (p. 40); il décrivait la révolution d'Octobre comme une révolution des classes moyennes et le système économique soviétique comme un capitalisme d'Etat (p. 74). La conclusion du classique du marxisme que vient de découvrir Rosenfeld est la suivante : « la classe ouvrière combative qui s'appuie sur le marxisme se rendra compte que l'œuvre de Lénine est un obstacle sur ce chemin, en tant que théorie d'une classe qui essaie de prolonger sa servitude » (p. 80). Pannekoek avait été anéanti politiquement par la critique pertinente de Lénine dès avant la première guerre mondiale; dans les années qui ont suivi 1920, il devint un ennemi acharné du marxisme.

rialiste dialectique. Il semble que Lénine soit accusé de mécanisme parce qu'il soutenait la thèse dialectique de l'interdépendance des choses et la thèse matérialiste du caractère objectif de cette interdépendance [85]. Mais il est clair que la confusion est du côté de Rosenfeld, qui suppose à tort que le matérialisme mécaniste est essentiellement déterministe à la manière de Newton ou Laplace et qui en déduit que, pour le dépasser, il serait d'abord nécessaire de laisser derrière soi le déterminisme. Comme on sait, cette forme de déterminisme — que Lénine critiqua comme unilatérale — n'est pas nécessairement (ni logiquement ni historiquement) un signe caractéristique de la conception mécaniste du monde. Il y eut des conceptions mécanistes, comme celle d'Epicure, qui admettaient l'action objective du hasard absolu ; de l'autre côté, il y a des conceptions essentiellement anti-mécanistes, comme les conceptions stoïciennes, mahométanes et calvinistes, qui professent une prédétermination stricte [86].

Ce qui est mécaniste, ce n'est pas d'insister sur le caractère génétique des événements et sur leur interdépendance, mais de croire que le hasard et la nécessité sont des pôles entièrement opposés. L'opposition rigide et mécaniste de ces deux catégories n'est pas le fait de Lénine, qui se moquait du positiviste Petzoldt et écrivait : « Nous sommes en présence du plus pur des métaphysiciens, d'un métaphysicien qui n'a aucune idée de la relativité de la distinction entre le fortuit et le nécessaire » [87]. Cette absolutisation mécaniste de catégories relatives — qui, détachées l'une de l'autre, ne peuvent effectivement être comprises — est soutenue par Rosenfeld, pour qui le hasard règne à l'échelon de l'atome, tandis que la causalité règne à l'échelon macroscopique (p. 405).

Un dialecticien ne devrait pas considérer le hasard et la nécessité comme deux modalités de l'être strictement séparées, s'excluant mutuellement et agissant chacune dans un domaine exactement défini, mais comme les pôles d'une opposition dialectique. Pour le matérialisme

---

85. Comme on le sait, Lénine, dans son œuvre de 1908, mettait l'accent sur l'aspect gnoséologique du problème du déterminisme tandis que dans ses cahiers philosophiques, il a traité du problème ontologique de la causalité comme d'un aspect de l'interdépendance (*Zusammenhang*). Voir Lénine : *Cahiers Philosophiques* (Editions Sociales, 1955).

86. Voir Maurice Cornforth : *Dialectical Materialism and Science* (London. Lawrence and Wishart, 1949), p. 42 : « La science continue à être mécaniste, même lorsqu'elle rejette le postulat du déterminisme et le remplace en dernier lieu par une loi statistique. La question de savoir si le mouvement de la matière obéit en fin de compte à des lois statistiques ou déterministes, est un différend métaphysique entre deux conceptions également mécanistes du mouvement de la matière ».

87. Lénine : *Matérialisme et empiriocriticisme*, Ed. Sociales 1948, p. 143.

dialectique, on trouve également le hasard à l'échelon macroscopique, où n'existent ni hasard pur et absolu ni nécessité pure et absolue ; hasard et nécessité n'existent pas par eux-mêmes comme modalités dernières, irréductibles ; comme pour d'autres contraires dialectiques, l'un naît de l'autre : le hasard à un échelon ou dans un contexte donné devient nécessité à un autre échelon ou dans un contexte modifié. Cette transformation du hasard en nécessité et inversement, qui a lieu selon des lois déterminées et dans des conditions exactement déterminées, n'est pas en dehors de l'interrelation, mais en est justement un aspect[88].

Une telle conception du hasard est naturellement étrangère au mécanisme.

Or le mécanisme, qui est un ensemble de théories concernant la structure de la réalité, peut être lié à une théorie de la connaissance aussi bien idéaliste que matérialiste, bien que la plupart des systèmes mécanistes aient effectivement été matérialistes. Nous sommes tous d'accord : le mécanisme reflète une image unilatérale, déformée de la réalité et il doit être critiqué et surmonté en conséquence. Cela n'est pas seulement vrai; c'est même de bon ton, surtout depuis que le positivisme et l'intuitionisme ont commencé, à la fin du siècle écoulé, à attaquer toutes les branches du matérialisme, y compris la branche mécaniste. Mais si nous voulons dépasser ces lieux communs à la mode, nous devons voir clair en ce qui concerne les points suivants : 1° qu'entendons-nous par mécanisme; 2° le mécanisme est-il actuellement le principal ennemi de la science ou non ; 3° comment le mécanisme doit-il être critiqué ?

La plupart des gens croient que le mécanisme est simplement une doctrine d'après laquelle tout peut être ramené à des particules qui se meuvent de côté et d'autre sous l'action de forces. Ce n'est là cependant qu'une forme du mécanisme, la plus répandue certes aux XVIIIe et XIXe siècles, mais ce n'est ni historiquement ni logiquement la seule forme possible du mécanisme[89].

Cela montre que nous devrions tout d'abord nous mettre d'accord

---

88. Voir Engels : *ouvr. cité* note 8, p. 42; mais surtout : *Dialectique de la nature*, pp. 219-223. Voir aussi M. Bunge : « What is chance? », *Science and Society* (New York), tome 15, pp. 209-231 (1951) et « The Impact of Levels on Determinism » (à paraître).

89. Descartes remplissait le monde d'un fluide élémentaire dont les mouvements tourbillonnants suffisaient à expliquer toute la réalité matérielle; Boscovitch, ainsi que d'autres dynamiciens, utilisaient des centres de force immatériels. Aucun d'entre eux ne considérait les particules comme réalités dernières; ils étaient cependant typiquement mécanistes,

sur la signification du mot « mécanisme » qui, il est vrai, est un des mots les plus mal définis de la philosophie. Pour parvenir à un tableau suffisant du mécanisme, il faudrait une longue étude, qui dépasserait le cadre du présent article ; cependant, pour pouvoir nous faire une idée de ce qu'on entend par mécanisme, il suffira d'énumérer les traits fondamentaux qui apparaissent dans son histoire et ont trait au problème dont nous discutons. D'après moi, ce sont les suivants :

1. Le mécanisme soutient que tout est ou bien juxtaposition de parties d'un élément simple ou bien combinaison de quelques éléments simples. Ces éléments peuvent être ceux de l'école de Milet, ou les atomes, ou les champs, ou les quanta, ou les sensations, ou autre chose ; ils sont considérés comme immuables. C'est ainsi que le changement est expliqué en termes d'éléments derniers immuables et inanalysables. Or, l'indivisibilité du quantum d'action — et la barrière définitive qu'elle oppose à la connaissance — est une hypothèse fondamentale de la mécanique quantique selon Heisenberg et Bohr ; une autre thèse mécaniste de cette interprétation est la conception du phénomène physique comme élément dernier, non analysable, comme un « tout indivisible formé par le système et les instruments d'observation » (p. 395).

2. Le mécanisme soutient la thèse que la nature est qualitativement finie, c'est-à-dire que la diversité est limitée et que, par conséquent, la connaissance est également limitée et peut, un jour, arriver à son terme (le plus tôt sera le mieux). C'est justement ce que dit la philosophie de la complémentarité : il n'existe au fond que deux aspects (complémentaires) de toute question ; la forme actuelle de la mécanique quantique est une description complète de la réalité physique et son interprétation est « un problème depuis longtemps tiré au clair » (p. 394).

3. Pour le mécanisme, il n'existe pas de niveaux d'organisation de la matière, ou il en existe au plus deux ou trois ; chaque forme de

---

entre autres parce qu'ils simplifiaient les choses à outrance et expliquaient tout au moyen d'une substance considérée comme dernière (immuable et inexplicable). Il est intéressant de remarquer que ces traits se retrouvent au centre de la philosophie officielle de la mécanique quantique. En effet, l'affirmation que la nature est fondamentalement simple est incluse dans l'affirmation que la théorie des quanta fournirait une description *complète* des phénomènes atomiques; et la thèse de l'existence d'un élément dernier à partir duquel est construit tout le reste est évidemment contenue dans la conception des phénomènes quantiques comme « phénomènes premiers », « élémentaires » (« *Urphänomene* »), c'est-à-dire indivisibles et non analysables.

mouvement doit être ramenée à une série de lois fondamentales dernières. Or, l'école de Copenhague n'admettait généralement que deux niveaux, le niveau microscopique et le niveau macroscopique ; elle n'a été forcée que tout récemment de reconnaître l'existence d'un niveau de « particules fondamentales » ; elle soutient le point de vue selon lequel la théorie actuelle des quanta fournit la série des lois fondamentales auxquelles on doit ramener les lois du monde macroscopique, soit dans le cas d'observations répétées [90], soit lorsque la constante de Plank peut être négligée — comme si les différences entre les deux niveaux n'étaient que de nature quantitative, mais non qualitative.

4. Le mécanisme affirme que les choses, qualités, catégories et relations sont fixées et extérieures les unes par rapport aux autres, que, par exemple, la nécessité et le hasard sont deux contraires irréductibles. Mais c'est là justement le cœur de la théorie de la complémentarité, puisqu'il y est dit des concepts complémentaires ou « conjugués » qu'ils n'entrent pas en conflit entre eux, de sorte qu'ils n'engendrent pas une troisième et nouvelle entité ; comme nous l'avons vu plus haut, c'est un trait typique des théoriciens de la complémentarité que de considérer le hasard et la nécessité comme deux catégories irréductibles et absolues.

5. Le mécanisme soutient la conception selon laquelle tous les changements ne sont autre chose que des changements de position, ou peuvent finalement être ramenés à des mouvements mécaniques de cette sorte ; le but de la science est donc de ramener tous les processus naturels à des changements de position. Contrairement aux thèses précédentes, celle-ci est résolument rejetée par l'école de Copenhague.

Cela suffira pour caractériser la position de la philosophie de la complémentarité vis-à-vis du mécanisme. Jusqu'à présent, en tout cas, nous voyons que, sur les cinq thèses mécanistes citées, les théoriciens de la complémentarité en soutiennent quatre. En ce qui concerne le cinquième principe mécaniste, qui se rapporte à l'existence de la matière dans l'espace et dans le temps et à la réduction du changement à un mouvement mécanique, les complémentaristes restent *en arrière* du mécanisme traditionnel, puisqu'ils affirment que rien ne se meut si nous n'effectuons pas par hasard une observation de la position « observable » à des moments différents. D'autre part, le matérialisme scientifique affirme que l'existence matérielle est certainement

90. Voir note 36.

davantage que la simple existence dans le temps et dans l'espace, le changement de position étant bien le mode de changement le plus élémentaire, mais non le seul. Bien loin de rejeter le principe de l'existence objective de la matière dans l'espace et dans le temps, comme le fait l'école de Copenhague, le matérialisme scientifique affirme qu'une telle existence n'est autre chose que la *condition préliminaire* à tous les modes supérieurs de l'être et du devenir, de sorte que le mécanisme, qui ne rend compte que de quelques bribes de tout cela, a tout de même quelque chose à dire sur la matière en mouvement, à savoir les *premiers* mots.

Nous pouvons donc en arriver à la conclusion que la philosophie de la nature de Bohr, Heisenberg et Rosenfeld n'est pas seulement, dans son ensemble, gnoséologiquement idéaliste, mais aussi ontologiquement mécaniste, en rejetant toutefois un des éléments positifs du matérialisme mécaniste à savoir la conception de l'existence objective de la matière dans l'espace et dans le temps, au bénéfice de la thèse anthropocentrique d'après laquelle l'observation serait l'alpha et l'oméga des sciences de la nature.

X. Comment le mécanisme devrait-il être critiqué ?

Quelques personnes semblent croire que le mécanisme est l'ennemi principal du progrès scientifique et même la cause de la résurrection de l'idéalisme à la fin du siècle dernier [91]. Il est hors de doute que les limites du matérialisme mécaniste ont rendu possible la réaction idéaliste, bien qu'elles n'aient pas produit elles-mêmes une telle réaction, étant donné que la résurrection de l'idéalisme est liée plus étroitement à la transformation de la bourgeoisie en classe réactionnaire. Je pense cependant que c'est une erreur de placer le matérialisme mécaniste et l'idéalisme sur le même plan et, encore plus, de considérer le premier comme plus nuisible au progrès scientifique que le dernier ; de la même façon qu'on ne met pas sur le même plan le libéralisme, si limité qu'il soit, et le fascisme. Car le matérialisme mécaniste simplifie et déforme la réalité, tandis que l'idéalisme subjectif nie purement et simplement l'existence propre de la réalité que nous voulons comprendre et dominer. Le matérialisme mécaniste est une explication rudimentaire et grossière des choses, tandis que l'idéa-

91. Voir par exemple note 3.

lisme est tout au plus une vision ; le premier est valable dans un domaine déterminé, tandis que le second n'est valable nulle part. Le matérialisme mécaniste est une première approximation — habituellement la première qu'on fasse en physique ; dans la mesure où il est capable de fournir une explication, il est utile et même, à un premier stade de la recherche, inévitable. L'idéalisme, par contre, n'est même pas une approximation grossière [92].

Par conséquent, le mécanisme doit, d'après moi, être critiqué dans la mesure où il constitue une vue *limitée*. Nous devrions le dépasser ; mais la plupart du temps nous sommes forcés de commencer par lui, car l'expérience nous enseigne que le matérialisme mécaniste fournit une première approximation de l'explication des phénomènes, approximation que ne permet pas l'idéalisme. En général, les idéalistes n'attaquent pas le mécanisme à cause de ses limites, mais parce que dans la plupart des cas il est lié à la reconnaissance de la matérialité du monde et parce qu'il constitue une tentative d'expliquer un monde que les idéalistes veulent le plus souvent voiler de mystère. Ce genre de critique du mécanisme est évidemment rétrograde.

L'attitude des personnes qui concentrent leur esprit critique sur le mécanisme — que d'ailleurs le plus souvent elles n'analysent pas correctement — sans se rendre compte qu'elles tombent ainsi dans le marais de l'idéalisme, cette attitude fut décrite, il y a presque un demi-siècle, dans un « célèbre pamphlet politico-philosophique » où il est dit : « La nouvelle physique a dévié vers l'idéalisme principalement parce que les physiciens ignoraient la dialectique. Ils ont combattu le matérialisme *métaphysique* (au sens où Engels employait ce mot et non dans son sens positiviste, c'est-à-dire inspiré de Hume), avec sa « mécanicité » exclusive et rejeté l'enfant avec l'eau du bain » [93].

Si l'on tombe d'accord que l'obstacle principal au progrès de la science est l'idéalisme et non le mécanisme (encore moins le matérialisme, avec lequel les idéalistes le confondent volontiers), la question de la critique du mécanisme peut recevoir la réponse suivante : le mécanisme doit être critiqué principalement sur la base de la critique de l'idéalisme ; ce sont les limitations du mécanisme, dont

92. S'il est vrai que des philosophes idéalistes (surtout Leibniz et Hegel) ont découvert des traits essentiels de la réalité, il est également vrai que, dans la mesure où ils ont pu faire de telles découvertes, ils ont tacitement renoncé à la méthode aprioriste qu'ils soutenaient.

93. Lénine : *Matérialisme et Empiriocriticisme*, Ed. Sociales 1948, p. 239 (traduction revue).

il partage un grand nombre avec d'autres théories non dialectiques, comme par exemple la philosophie de la complémentarité, qui doivent être éliminées et non ses côtés positifs. Telle est la voie progressiste pour effectuer la critique du mécanisme et il est regrettable que Rosenfeld ait emprunté l'autre voie, en adoptant les éléments morts et rejetant les côtés positifs ; en d'autres termes, il est dommage qu'il ait emprunté la voie à la mode, consistant à jeter l'enfant (matière en mouvement) avec l'eau et même à garder une bonne partie de celle-ci.

Conclusions

Notre conclusion principale est que la conception de la complémentarité, qui constitue le noyau de la philosophie officielle de la mécanique quantique, est en contradiction violente aussi bien avec la théorie matérialiste de la connaissance qu'avec la théorie dialectique du changement. Par contre, elle entre dans le cadre d'une philosophie dont la complémentarité est l'enfant chéri, à savoir l'empirisme logique. Rien d'étonnant à cela, car les tailleurs ont taillé leur propre uniforme.

Par conséquent, le professeur Rosenfeld a choisi une arme inadéquate pour défendre le point de vue conservateur dans la physique atomique. Le matérialisme dialectique ne peut pas, s'il est bien compris, être utilisé pour appuyer des conceptions conservatrices, que ce soit en politique ou en physique. Tout au contraire, il est destiné à inspirer de nouvelles voies de progrès ; ce progrès est freiné en microphysique par le dogmatisme de la plupart des complémentaristes et par la nature même du positivisme, qui favorise des théories de la connaissance minimum, comme la théorie de la « matrice S » et les théories de la longueur élémentaire. L'erreur commise par Rosenfeld dans le choix de son arme provient de ce qu'il a pris le positivisme pour le matérialisme dialectique, confusion qu'il aurait pu éviter s'il avait lu avec plus de soin les auteurs auxquels, comme à Engels et Lénine, il attribue des pensées qu'ils n'ont jamais exprimées.

Le moment a été mal choisi pour tenter de démontrer l'accord entre la philosophie oficielle de la théorie des quanta et le matérialisme dialectique. D'abord parce qu'une quantité de critiques bien fondées de cette interprétation et de la philosophie qui l'accompagne ont été

formulées précisément au cours des dernières années [94]. En second lieu, et c'est encore plus important, parce que plusieurs tentatives ont été effectuées pour faire progresser les interprétations matérialistes et que de nouvelles formulations de la mécanique quantique ont même été proposées [95]. En troisième lieu, parce que la stagnation de la physique théorique — contrastant avec l'abondance de travail expérimental — devrait attirer l'attention sur le fait que quelque chose ne va pas dans le point de vue orthodoxe et qu'il est bien éloigné d'être « une cause entendue depuis longemps » (p. 409).

Ce qui précède n'est pas conçu comme une critique personnelle contre le professeur Rosenfeld, dont l'œuvre scientifique a droit à notre respect ; sa campagne pour la défense de l'école orthodoxe de la physique atomique a plutôt été une bonne occasion d'effectuer un examen (auquel chaque physicien matérialiste dialecticien s'est livré au cours de ces dernières années ou se livrera probablement à plus ou moins brève échéance), examen qui n'est certainement pas dépourvu d'une bonne dose d'autocritique.

De nombreuses tentatives ont été faites avant celle de Rosenfeld pour concilier le matérialisme dialectique avec l'interprétation habituelle de la théorie des quanta; elles ont évidemment échoué aussi totalement que celle de Rosenfeld. Après la formulation des interprétations matérialistes de la théorie quantique, on voit pourquoi il y a eu tant de tentatives divergentes en ce sens, pourquoi deux marxistes n'arrivaient pas à se mettre d'accord sur la signification des relations d'incertitude de Heisenberg et des questions qui y touchent. La raison en est que ces tentatives visaient à donner une interprétation matérialiste dialectique... d'un morceau de philosophie positiviste. La vérité est que la conception usuelle de la mécanique quantique contient à sa base une grande part de philosophie positiviste.

La philosophie n'est pas seulement une superstructure de la science, que l'on peut rejeter tout en conservant la charpente scientifique. La philosophie positiviste peut être trouvée dans la physique théorique elle-même, y compris dans certains des axiomes de l'interprétation

---

94. Voir par exemple S.G. Souvorov et autres : *Questions Scientifiques*, tome I, *Physique* (Paris : Editions de la Nouvelle Critique, 1952).

95. Voir entre autres D. Bohm : *The Physical Review*, 85, 166, 180 (1952); T. Takabayasi, *Progress of Theoretical Physics* (Japon), vol. 8, p. 143 (1952) et vol. 9, p. 187 (1953); Louis de Broglie : *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?* (Paris : Gauthier-Villars, 1953); A. Suddaby and M. Cornforth : « The Philosophical Problems of Quantum Physics », *The Marxist Quaterly* (London), vol. 1, pp. 154-168 (1954). Voir aussi M. Bunge : « A Survey of the Interpretations of Quantum Mechanics », *American Journal of Physics*, tome 24, p. 272 (1956).

physique du formalisme mathématique, comme en témoigne le principe des observables. C'est pourquoi les positivistes étaient les seuls à avoir la chance de posséder une philosophie relativement cohérente de la mécanique quantique : ils n'avaient pas besoin d'adapter *a posteriori* ce qui, dès le début, était en accord avec leurs thèses.

Mais nous avons dépassé ce stade. Nous voulons maintenant envisager de nouvelles théories qui ne soient pas *ab initio* bourrées de préjugés anthropocentriques.

Buenos Aires, Janvier 1954.

Mario BUNGE.

Ueber philosophische Fragen der Modernen Physik, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, IV (1956), 4, pp. 467-496.

Traduit par Eva LÉVY.

SUR LES PROBLEMES PHILOSOPHIQUES DE LA PHYSIQUE ACTUELLE

Les discussions sur les problèmes philosophiques posés par les sciences de la nature qui se poursuivent dans les revues *Voprossy Filosofii* et *Ouspékhi Fizitcheskikh Naouk*, ainsi que les deux conférences que nous avons eues à Kharkov, prouvent l'intérêt croissant que prennent pour ces questions de larges cercles intellectuels soviétiques.

Cependant, la plupart des discussions et des articles ont été consacrés à la critique des opinions émises par tels ou tels physiciens ou philosophes étrangers et il y a jusqu'ici relativement peu d'articles ou d'interventions qui aient eu un caractère vraiment constructif.

Dès 1948, au cours des débats que nous avons eus à Kharkov, je remarquais que les physiciens soviétiques, qui occupent sans doute aucun des positions marxistes, matérialistes, devraient faire progresser la science philosophique sur la base de l'idéologie marxiste et, en particulier, développer d'une manière constructive la philosophie des sciences de la nature. La critique des opinions émises par les savants et les pseudo-savants de l'étranger est une chose tout à fait nécessaire et de grande valeur, mais ce n'est qu'un aspect de la question, aspect qui, dans une certaine mesure, est subordonné à un problème beaucoup plus important : faire progresser la philosophie des sciences de la nature en abordant de façon matérialiste l'ensemble des problèmes qu'elles posent. Aussi l'objet principal de notre conférence [1] est-il de réunir toutes les forces des physiciens et des philosophes aux

1. Il s'agit de la conférence sur les problèmes philosophiques de la physique contemporaine qui s'est tenue à Kiev du 17 au 19 mars 1951, à l'Académie des Sciences d'Ukraine, avec la participation de plus de 60 savants et travailleurs scientifiques, et dont le présent texte est le rapport d'ouverture (*N.d.l.R.*).

fins de résoudre les problèmes essentiels que posent aujourd'hui les sciences physiques.

Il est absolument incontestable que la physique connaît en ce moment une période de crise. Pendant ces 10 ou 15 dernières années elle a peu à peu et, pour beaucoup, insensiblement, conduit à des changements radicaux dans nos idées sur la matière, sur le mouvement, sur l'espace et le temps. Malheureusement, les succès colossaux de la physique s'accompagnent d'une mathématisation toujours plus poussée et de l'apparition d'un nombre toujours plus important d'abstractions ; les spécialistes eux-mêmes ont parfois du mal à s'orienter dans celles-ci et à trouver une correspondance adéquate entre elles et les objets du monde réel.

Il ne faut pas oublier ce que disait Lénine, à savoir que dans la science existe toujours « la possibilité de l'envol imaginatif hors de la vie ». Il est impossible de développer la science sans faire appel à des abstractions. Le puissant développement de la physique classique n'a été possible que lorsque l'on eut compris que cela menait à une impasse de prendre l'expérience quotidienne sans esprit critique et que la découverte de lois générales n'était possible que si l'expérience et son interprétation se libéraient de l'influence de l'accessoire, de ce qui n'est pas caractéristique du phénomène étudié.

En mécanique, cela n'a pas été très difficile et les abstractions comme le mouvement sans frottement ou celles, plus poussées, comme les fonctions de Lagrange, de Hamilton, etc., n'ont jamais perdu le contact avec des réalités définies. C'est précisément ce recours à l'abstraction qui a permis de passer des problèmes particuliers de la mécanique aux lois générales, puis de revenir aisément du général au concret. Ce sont les abstractions liées à tels ou tels aspects du monde réel qui ont permis d'introduire dans la science la méthode mathématique sans laquelle on ne peut concevoir le développement des sciences exactes. Ce recours à l'abstraction dans la mécanique, qui a aidé à établir les lois les plus générales, ne s'est pas fait instantanément. La science a connu des périodes de recherches douloureuses, où l'on confondait énergie cinétique et impulsion et où l'on formulait la loi de la conservation de l'énergie comme loi de la conservation de la force.

Il faut souligner tout particulièrement que, si nous reconnaissons aujourd'hui que les abstractions de la mécanique expriment la réalité objective, cela ne tient pas à une habitude prise peu à peu — encore que ce facteur psychologique joue aussi son rôle —, mais au fait que nous avons compris pourquoi, dans la vie courante, les corps ne se

comportent absolument pas comme devraient se comporter des points matériels abstraits, des fils impondérables, des billes d'une élasticité absolue, etc. Derrière toutes les « anomalies » et toutes les dérogations aux lois de la mécanique, nous voyons des « causes », nous voyons que ces écarts sont *provoqués* par des influences accessoires dont il n'a pas été tenu compte dans le tableau idéalisé du phénomène.

Il faut remarquer également que le lien qui unit les abstractions de la physique à tels ou tels aspects du monde réel peut, au fur et à mesure que se développe la science, changer considérablement. La notion de champs électriques et magnétiques s'est conservée dans la science depuis l'époque de Faraday et de Maxwell, mais le sens physique que nous donnons à cette notion s'est fortement modifié.

La notion de masse s'est conservée depuis Newton, mais en ce qui concerne son contenu physique, elle est aujourd'hui beaucoup plus vaste et plus riche qu'elle ne l'était du temps de Newton. La notion d'entropie, qui était à l'époque de Kelvin une simple fonction thermique, a maintenant acquis une vie nouvelle et est devenue une réalité incomparablement plus intéressante, une sorte de mesure de désordre. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'adoption des abstractions a permis d'introduire dans la science la méthode mathématique. Le rôle des mathématiques en physique, nous semble-t-il, n'est pas toujours bien compris. On leur assigne souvent un rôle de simple auxiliaire. On dit parfois que les lois physiques sont découvertes par les expérimentateurs et que les théoriciens tirent toutes les conséquences possibles de ces lois. Qu'il soit loin d'en être ainsi, il suffirait de l'exemple célèbre des équations de Maxwell pour le démontrer.

Sur la base du matériel expérimental de Faraday, Maxwell ne pouvait écrire que :

$$\text{rot}\, E = -\frac{1}{c}\frac{\partial H}{\partial t} \text{ et rot}\, H = 0;$$

Au lieu de cela, il écrit sa seconde équation :

$$\text{rot}\, H = \frac{1}{c}\frac{\partial E}{\partial t},$$

qui n'était alors confirmée par aucune expérience. Le résultat de cette géniale conjecture fut que Maxwell était arrivé à une équation d'ondes et à la théorie électromagnétique de la lumière.

L'exemple de E. Schrödinger n'est pas moins frappant, qui, en 1925, écrivit sa célèbre équation avec la fonction ψ et qui, comme il le disait lui-même, tout en étant persuadé qu'elle était mathématiquement correcte, ne savait pas ce qu'elle signifiait et ne pouvait pas saisir la nature physique de la fonction ondulatoire ψ. Comme on le sait, les discussions sur la question de savoir à quelle réalité correspond la fonction ψ n'ont pas encore cessé, depuis trente ans que cette équation a été écrite. Aussi devons-nous examiner une fois de plus les différentes interprétations possibles de cette abstraction.

On voit par les exemples qui précèdent que le rôle des mathématiques en physique est absolument différent de celui qu'elles ont dans les sciences appliquées. Aussi l'affirmation de P. Dirac, dans ses *Principes de la Mécanique quantique*, selon laquelle « les mathématiques ne sont qu'un outil », me paraît-elle nettement erronée.

Les idées de la physique classique ont toujours été, à leur origine, fondées sur les idées de la vie courante. Au fur et à mesure que se développait la physique, ces idées primitives et naïves furent peu à peu remplacées par des notions généralisées souvent nullement évidentes et ne s'appuyant pas sur des idées de la vie courante. Il ne pouvait en être autrement puisque, dans l'expérience de tous les jours, directement perçue par nos organes des sens, nous ne rencontrons pas les propriétés d'objets tels que l'électron ou le proton. Nous avons tenté, mais c'était une tentative sans espoir, de reporter sur l'électron les propriétés des corps habituels — l'étendue et la forme — en oubliant qu'avec la réduction des dimensions des changements qualitatifs considérables étaient inévitables. L'expérience montre quels sont les changements qualitatifs qui rendent ces objets du monde microscopique absolument différents des corps macroscopiques de notre entourage habituel. Si nous entreprenons de décrire ces propriétés, il est inévitable que nous en arrivions à définir des propriétés qui sont contradictoires entre elles du point de vue du « bon sens » habituel. Nous en savons trop peu sur l'électron, nous ne connaissons que quelques-unes de ses propriétés, que ne possèdent pas les corps macroscopiques classiques, mais nous pouvons décrire ces propriétés à l'aide d'abstractions mathématiques précises.

Je voudrais prendre l'exemple suivant : imaginons un mathématicien aveugle de naissance (il y en eut plus d'une fois). Il est clair qu'un tel mathématicien n'a jamais vu d'anneaux de tourbillon (anneaux de fumée). Il est très difficile de lui expliquer ce que c'est ; mais, étant mathématicien, il peut sans difficulté comprendre la théorie des anneaux de tourbillon de Helmholtz. Ainsi, il assimilera

acilement toutes les propriétés d'un objet que l'expérience quoti-
lienne ne lui a jamais fait rencontrer et, mieux, dont les proprié-
és, dans une large mesure, sont en contradiction avec son expérience
juotidienne (l'impénétrabilité réciproque des anneaux de tourbillon).

Les propriétés de l'électron que reflètent les formules de la méca-
ıique des quanta n'ont pas d'analogues dans le monde auquel nous
ommes accoutumés ; aussi les tenons-nous pour contradictoires (par
exemple, ses propriétés simultanément corpusculaires et ondulatoi-
es). Elles ne sont contradictoires que parce que, dans notre vie de
ous les jours, nous ne rencontrons pas d'objets qui aient en même
emps ces propriétés. Ainsi, les abstractions mathématiques expri-
ment les propriétés de l'électron incomparablement mieux et bien
plus précisément que la représentation par des modèles qui doivent
« tant bien que mal » concilier des inconciliables.

Cela nous contraint à reconnaître que les mathématiques, dans la
physique contemporaine, ne sont pas un simple instrument de calcul ;
sans les mathématiques, une compréhension pleine et entière des
propriétés des objets du monde de l'infiniment petit est impossible.

D'un autre côté, la mathématisation de la physique offre le dan-
ger d'une perte de contact avec la réalité. Voici comment. Il est par-
faitement clair qu'aucune construction théorique, aussi ingénieuse et
aussi belle qu'elle paraisse, ne peut être ni acceptée ni répandue si
les conséquences qu'on en peut tirer ne sont pas confirmées par l'ex-
périence. Ainsi a disparu dans le Léthé la nouvelle électrodyna-
mique de P. Dirac (1946), ingénieuse et vraiment belle, qui sup-
posait l'existence de charges magnétiques isolées. Mais toute théorie
en accord avec l'expérience n'est pas pour autant acceptable. Il y a
le danger que les constructions théoriques, au lieu de découvrir de
nouvelles lois générales, se bornent à une description de type phé-
noménologique.

Dans la première édition de ses *Principes de la mécanique quan-
tique*, P. Dirac écrivait que « *le seul objet de la physique théorique
est de calculer et d'obtenir des résultats comparables aux résultats de
l'expérience* ; il est absolument inutile d'exiger en plus une descrip-
tion satisfaisante de l'évolution complète des phénomènes ». Dans
toutes les éditions qui ont suivi, il a supprimé cette phrase, qui était
en contradiction avec tout le contenu de son ouvrage. Sur la base des
recherches de P. Dirac exposées dans cet ouvrage, on est parvenu pour
la première fois à traiter le problème du mouvement d'un électron
dans des champs électromagnétiques comme un problème de méca-
nique quantique ; pour la première fois on a établi, ou plus

exactement prédit, certaines propriétés du vide, sa polarisation, l'existence d'un vide d'électrons ; on prédit aussi l'existence de corpuscules nouveaux, les positons, auxquels personne ne pouvait même songer. La phrase de P. Dirac que nous avons citée était le tribut du savant aux tendances positivistes à la mode en Occident.

Les théoriciens de la physique évitent d'employer les mots « la théorie explique ». Au lieu de cela, ils préfèrent dire que les équations de la mécanique quantique « décrivent » le comportement de l'électron ou de tel autre système quantique. Evidemment, cette affirmation est juste, et cela ne vaudrait guère la peine de perdre tant de temps et d'efforts à étudier l'appareil de la mécanique quantique si celle-ci n'était pas à même de prédire le comportement d'un système quantique. La description du comportement révèle les propriétés internes des objets quantiques qui se manifestent dans leur interaction avec les autres objets microscopiques et macroscopiques. Cependant, la tendance à voir dans l'appareil de la mécanique des quanta plus que de simples équations décrivant le comportement des objets quantiques est parfaitement licite et naturelle. Pour illustrer notre point de vue, prenons l'exemple suivant.

Comme on le sait, dès avant la naissance de la théorie électromagnétique de la lumière, l'optique dite ondulatoire avait obtenu de très gros succès. En supposant seulement l'existence d'une fonction d'onde scalaire, on était parvenu, vers le milieu du XIXe siècle, à expliquer, ou plus exactement à décrire, une énorme quantité de phénomènes de l'optique physique : tous les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation découlaient des postulats fondamentaux de l'optique ondulatoire. L'optique cristalline atteignit, elle aussi, un très grand degré de perfection. La prédiction théorique par Hamilton de l'existence de la réfraction conique fut le triomphe de cette dernière discipline.

Quelles étaient les hypothèses physiques qui étaient à la base de l'optique ondulatoire et qui conduisirent au triomphe de cette branche de la physique ? Celles-là même que nous admettons encore à l'heure actuelle quand nous étudions la théorie de la diffraction de Kirchhoff ou appliquons celle-ci à des problèmes concrets : la simple hypothèse de l'existence d'une fonction d'onde scalaire et de ses dérivées. Mais la marche triomphale de la théorie ondulatoire de la lumière se termina dès que l'on eut attribué à cette fonction d'onde scalaire la signification d'une onde élastique dans l'éther, support de la lumière. Il fallait attribuer à ce dernier des propriétés physiques si contradictoires qu'il devint clair qu'il était devenu impossible de

développer l'optique ondulatoire sans opérer des changements essentiels dans nos représentations de la nature physique de la lumière.

Ces changements essentiels, c'est la théorie électromagnétique de Maxwell qui les apporta. Je voudrais remarquer qu'un an ou deux avant l'apparition des travaux de Maxwell, la théorie purement ondulatoire de la lumière avait trouvé sa forme la plus parfaite dans l'œuvre peu connue de Mac Culloch; par leur aspect mathématique, les équations de Mac Culloch coïncident parfaitement avec les équations de Maxwell, tout en s'en distinguant radicalement par l'interprétation physique des grandeurs qui y figurent.

La victoire totale de la théorie électromagnétique fut conditionnée par le développement extraordinairement rapide, fécond et surtout universel de la science des champs électromagnétiques. Ce qui a conduit à la chute de la théorie ondulatoire de la lumière, ce n'est pas un meilleur accord avec les données de l'expérience, mais le fait que l'électrodynamique résolvait d'un seul coup des difficultés qui, pour les physiciens du milieu du XIXe siècle, paraissaient des difficultés gnoséologiques insurmontables, concernant les propriétés élastiques contradictoires de l'éther.

En quoi consiste, à mes yeux, le défaut fondamental de la mécanique quantique non relativiste ? On dit qu'elle représente la synthèse des conceptions corpusculaire et ondulatoire. Mais où est donc cette synthèse ? L'interprétation statistique habituelle de la fonction ψ ne la donne pas. De même que de nombreux physiciens expérimentateurs, j'ai cherché vainement dans la fonction d'onde une certaine essence matérielle, se manifestant par sa relation avec un champ.

Je ne suis pas satisfait par la mécanique quantique que l'on nous offre dans de nombreux manuels et, dans le même temps, je l'admets intégralement. Il n'y a là ni contradiction ni inconséquence. La situation est à mon avis exactement la même lorsqu'on expose la théorie de la diffraction de Kirchhoff. On considère un champ d'ondes caractérisé par la fonction d'onde scalaire U et ses dérivées. On peut ne parler à ce propos d'aucun champ électromagnétique. A la question d'un auditeur perplexe : « qu'est-ce que U ? » on peut répondre imperturbablement : « Mais enfin, en quoi la fonction d'onde scalaire vous déplaît-elle ? Toutes les expériences confirment nos calculs ! »

Les camarades qui ont assisté à notre discussion philosophique et physique de Kharkov, en 1952, se souviennent que cette réponse sous forme de question y fut donnée par un des représentants les plus en vue de la physique théorique contemporaine, l'académicien

V.A. Fock. Quant à moi, U ne me plaît pas tout simplement parce qu'il existe un champ électronique, représenté par d'autres grandeurs; si vous m'expliquiez qu'en résolvant un problème donné nous pouvons, pour simplifier, caractériser le champ, non pas par des grandeurs vectorielles, mais par une simple fonction scalaire, alors, je serais complètement d'accord avec vous.

Il existe des champs électromagnétiques quantifiés et des champs quantifiés d'électrons-positons qui sont caractérisés par des opérateurs (nombres q), satisfaisant à l'équation de Dirac. Quand on résout certains problèmes et quand on passe aux caractéristiques numériques, il convient de faire intervenir les espérances mathématiques des différentes grandeurs, c'est-à-dire de passer aux calculs statistiques.

La mécanique quantique d'aujourd'hui, relativiste ou non-relativiste, est une théorie de champs quantifiés parfaitement réels, et non pas seulement de champs de probabilité. En agissant sur ces champs, nous agissons sur des champs d'électrons-positons et sur des champs électro-magnétiques et, à travers eux, également sur la fonction de probabilité.

Avons-nous besoin de la mécanique quantique dite ordinaire ?

Oui, bien sûr, puisqu'elle permet de résoudre une série de problèmes capitaux de la physique de l'atome. Mais il faut l'enseigner du point de vue de la théorie actuelle des champs quantiques. A plus forte raison, il est impossible de mener des discussions philosophiques en restant dans le cadre des idées primitives de N. Bohr, de M. Born et de W. Heisenberg des années 1926-1930. Je n'ai jamais pu comprendre la tendance de certains camarades à défendre et à soutenir des positions irrémédiablement vieillies et présentant une masse de difficultés gnoséologiques qui, dans le cadre de ces positions, ne peuvent pas trouver de solution matérialiste, mais disparaissent totalement si nous reconnaissons la réalité des champs de la mécanique des quanta. On peut objecter à cela que la théorie actuelle des champs quantiques vient tout juste de prendre son essor, qu'il y a des difficultés avec les infinis, que tout n'y est pas encore clair et compréhensible. Mais une théorie n'atteint jamais la perfection. De plus, il existe la méthode de seconde quantification qui, par le passage à la représentation L, aboutit à des équations caractérisant certains champs physiques et non pas des champs de probabilité.

C'est pourquoi j'invite les camarades à ne jamais oublier, dans nos débats et nos discussions, que nous vivons en 1954, et non pas en 1926, et qu'il existe des champs réels d'électrons-positons, des champs électromagnétiques, des champs de mésons, de nucléons, etc. et

non pas simplement une fonction d'onde dont le carré détermine la probabilité d'un état donné d'un objet quantique.

Quelles difficultés la théorie quantique des champs lève-t-elle ? Tout d'abord, le comportement des objets quantiques est défini par des grandeurs opératorielles caractérisant des champs réels. Lesquels existent toujours et partout. Les corpuscules que nous appelons photons, électrons, etc. sont les états excités des champs. Ces champs sont toujours quantifiés et, par conséquent, l'énergie se dégage toujours en un point. Même pour le champ le plus simple, le champ électromagnétique, l'expression de l'énergie

$$\int \frac{E^2 + H^2}{8\pi} dv$$

n'a directement, sous cette forme, aucun sens au point de vue physique. C'est pourquoi la question de la réduction, c'est-à-dire de la concentration en un seul point de l'énergie considérée comme répartie dans tout le champ, n'a plus de sens. Le champ de la mécanique quantique est un champ d'ondes, mais l'énergie y est toujours liée à des objets infiniment petits de l'espace.

Ensuite, un champ non excité, c'est-à-dire un champ dont nous ne pouvons pas déceler directement l'énergie, agit sur le comportement du champ excité. Dans toute expérience d'interférence à l'aide de miroirs, etc, nous modifions le champ en disposant ces appareils, nous le réglons et définissons ainsi le résultat de l'interférence.

Pour illustrer notre pensée, considérons un réseau cristallin parfait, se trouvant d'abord au zéro absolu et, par un moyen quelconque, formons à l'intérieur du réseau un quantum de vibrations acoustiques, un phonon; ce phonon représentera l'excitation de l'un des types possibles de vibrations correspondant à son vecteur d'onde. Où se trouvera-t-il ? Peut-on lui assigner des coordonnées parfaitement déterminées (p, q) ? Evidemment, non. Cette excitation passera d'un nœud du réseau à un autre et la *probabilité* qu'elle se trouve en tel ou tel endroit sera déterminée par la figure d'interférence *que les vibrations de zéro de la fréquence considérée auront créée.*

J'attire tout particulièrement votre attention sur l'énoncé suivant, car il permet de comprendre d'une manière concrète et assez précise le lien qui existe entre les particules et les champs : la figure d'interférences non révélée, pour ainsi dire potentielle, mais néanmoins bien réelle, existait déjà avant l'apparition du phonon. Le phonon, étant l'excitation d'un des types de vibration de zéro, ira (plus exactement, émigrera) dans les endroits où l'intensité des vibrations de zéro

du type donné est maximum. Il peut être absorbé, par exemple en provoquant une émission infra-rouge, et le dégagement de l'énergie se fera toujours en un point, bien que le déplacement du photon corresponde à une figure d'interférence étalée. A certains égards, les vibrations de zéro du réseau « pilotent » le phonon. Nous pouvons faire varier la forme du cristal de telle sorte qu'apparaisse un type déterminé de vibrations, créer un nombre déterminé de maxima et de minima de la figure d'interférence. Le phonon admis dans le réseau doit « révéler » cette figure d'interférence. On peut, par exemple, tracer sur l'une des faces une série de traits, réaliser un réseau de diffraction. Alors, les phonons se répartiront dans l'espace comme des ondes diffractées. Ce qui est particulièrement important, c'est que la figure d'interférence *existait* même *avant l'apparition du phonon ;* ce dernier, possédant un excès d'énergie, permet d'observer la figure d'interférence préexistante.

Il est maintenant facile de passer au champ électromagnétique. Au lieu d'un cristal, imaginons une cavité résonante fermée, ayant la forme d'un parallélépipède. Si la température des parois métalliques n'est pas égale à zéro, les charges fluctuantes sur les parois provoqueront l'apparition de champs électriques qui formeront dans la cavité fermée une superposition très complexe d'ondes stationnaires. Mais, pour un vecteur d'onde donné, ce sera un type relativement simple d'oscillations. On peut encore les simplifier par des changements appropriés dans la forme de la cavité, c'est-à-dire produire seulement un type particulier de vibrations. Si l'on fait baisser la température de la cavité jusqu'à zéro, l'intensité des ondes stationnaires diminuera, mais, ainsi que le montre la théorie, la formule suivante sera également correcte dans ce cas :

$$\sum E = \sum Nh\nu + \sum \frac{h\nu}{2},$$

où N est le nombre de photons. Ainsi, même pour T = O, il existera un fond de vibrations de zéro obéissant aux mêmes lois de l'électrodynamique et produisant les mêmes nœuds et les mêmes ventres. L'apparition d'un photon signifie l'excitation d'un certain type de vibrations et la probabilité de présence du photon sera plus grande là où les vibrations de zéro ont créé un ventre. Le photon rend simplement visible la figure d'interférence qui existait déjà avant son apparition. Cette façon de voir les choses, me semble-t-il, permet une interprétation concrète des grandeurs opératorielles de l'électrodynamique quantique, élucide la synthèse des représentations ondulatoires et corpusculaires et attribue une réalité précise aux états dits de superposition.

Ainsi, les ondes des vibrations de zéro doivent jouer un rôle essentiel en électrodynamique, puisque, dès avant l'émission du photon, elles créent une figure d'interférence déterminée. Le fond de vibrations de zéro constitue l'un des aspects de ce que l'on peut appeler le monde submicroscopique. Une telle interprétation peut-elle être vérifiée expérimentalement ? Au premier abord, il semble que non, puisque les vibrations de zéro représentent le plus bas de tous les états énergétiques possibles et qu'elles ne peuvent avoir une action directe sur quelque appareil ou corps d'épreuve que ce soit. En fait, il n'en est pas tout à fait ainsi. Comme je le montrerai plus loin, la probabilité qu'un atome subisse une transition d'un état excité à l'état fondamental est en grande partie déterminée par la densité des vibrations de zéro. Aussi me semble-t-il possible, en principe, d'observer une figure d'interférence de vibrations de zéro en utilisant à titre de corps d'épreuve des atomes excités. La vitesse de la transition à l'état fondamental doit montrer la présence de nœuds et de ventres d'interférences.

En rapport avec ce point de vue, qui n'est qu'un essai d'illustration des notions abstraites de l'électrodynamique quantique, je voudrais rappeler la fameuse discussion d'Einstein, Podolski et Rosen avec N. Bohr, sur ce qu'on appelle le caractère incomplet de la description donnée par la mécanique quantique. Pour que la chose soit plus nette, je simplifierai considérablement l'expérience imaginaire qui, d'après A. Einstein, montre le caractère incomplet de la mécanique quantique.

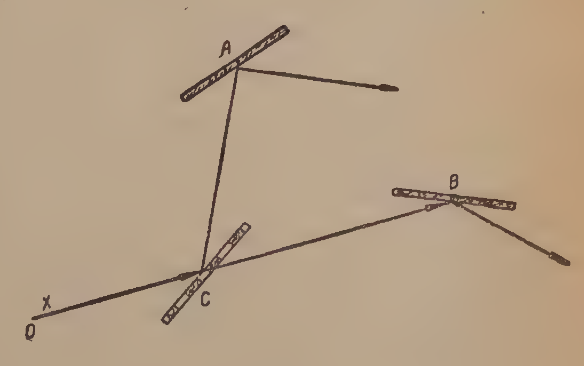


Fig. 1

Une source de lumière O émet des photons séparés (*fig.* I). Puis les photons tombent sur un miroir semi-transparent C et, s'étant divi-

sés entre deux trajets, ils sont réfléchis par les miroirs légers mobiles *A* et *B* qui peuvent toujours indiquer le trajet emprunté par le photon, *OCA* ou *OCB*. Si l'on rend les miroirs fixes, le rayon divisé par le miroir C donnera l'état de superposition

$$\psi = C_1 \psi_1 + C_2 \psi_2,$$

où $|C_1|^2 + |C_2|^2 = 1$, dans lequel le photon, comme on dit, appartient aux deux rayons simultanément. Si on libère à nouveau les miroirs *A* et *B*, la déviation du miroir *A* sous l'influence du photon prouvera l'existence de celui-ci dans le rayon *OCA* et, par conséquent, l'état $\psi = C_1 \psi_1 + C_2 \psi_2$ (*a*) se transformera en l'état $\psi = \psi_1$ (*b*) et $C_1 = 1$, $C_2 = O$. L'enregistrement du miroir *B* donnera l'état $\psi = \psi_2$ (*c*) et $C_1 = O$, $C_2 = 1$. Chaque fois, les passages de l'état initial (*a*) à (*b*) ou à (c) ont été provoqués par l'enregistrement du photon par le miroir *A* ou par le miroir *B*. Le fait que, quand les miroirs sont fixés, il existe un état de superposition (*a*) découle de la possibilité d'interférence des rayons réfléchis par les miroirs immobiles. Mais il est facile de voir que la détermination précise du trajet du photon est possible même quand un seul des miroirs *A* et *B* est mobile.

Pour simplifier, supprimons complètement le miroir B (*fig.* 2).

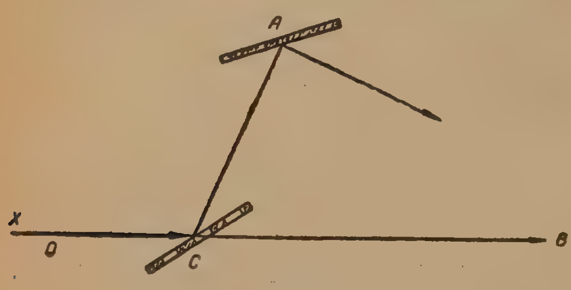


Fig. 2

Si, après l'émission du photon, le miroir *A* subit un recul, nous savons que le photon se trouvait sur la branche *CA*. Si, après l'émission du photon, le miroir *A* n'a pas reculé, nous dirons de façon aussi certaine que le photon a emprunté le chemin *OCB*, d'où la possibilité de l'état :

$$\psi = \psi_2, C_1 = O, C_2 = 1$$

Mais quelles sont les causes qui ont provoqué le passage à l'état (c) ? Si A n'a pas reculé, c'est qu'aucune action ne s'est exercée sur le système qui se trouvait dans l'état (*a*) et, cependant, il est passé à l'état (*c*). Einstein affirme que, ou bien 1° nous devons reconnaître que nous pouvons faire passer un système *quantique* d'un état à un autre sans exercer sur lui aucune action, ou bien 2° la description donnée par la mécanique quantique est incomplète, c'est-à-dire que le comportement du système, le passage à (*c*) doit être impliqué d'une façon ou d'une autre dans l'état initial du système. C'est pourquoi la description de l'état initial (*a*) n'est pas complète. Comme on le sait, N. Bohr, dans sa réponse à Einstein, invoquant son principe de complémentarité, affirme que c'est la possibilité même qu'a l'expérimentateur de déterminer l'existence de l'état (*b*) ou de l'état (*c*) qui transforme l'état primitif. Malgré ses vingt ans d'âge, la controverse Einstein-Bohr continue à faire l'objet d'âpres discussions.

Le professeur A.D. Alexandrov (cf. *Comptes rendus du colloque organisé par l'Institut physico-technique*, 1952, p. 86) a donné un exemple très ingénieux de la possibilité du passage d'un système d'un état à un autre sans action directe sur l'objet.

Du point de vue de l'électrodynamique quantique, toute cette discussion a perdu son sens ; à ce qu'il me semble, c'est le point de vue d'Einstein qui est le plus juste, et voici pourquoi. L'introduction d'un miroir non fixé et extrêmement léger change l'état initial, puisque les conditions aux limites pour le champ électromagnétique à la surface du miroir A, champ *qui existe avant* l'arrivée du photon, sont différentes de celles qui existent à la surface d'un miroir fixe (massif), et ces conditions modifiées auraient dû être prises en considération dans la description du champ électromagnétique quantifié. Ainsi, (*a*) est incorrecte. Le passage de l'opérateur $(\breve{\psi})$ à la fonction d'onde ψ doit tenir compte des conditions modifiées à la surface du miroir « léger » A.

Nous voyons ainsi que les états de superposition apparaissent comme des états pleinement réels, bien qu'à chacun d'entre eux nous ne puissions affecter une énergie déterminée. Je prendrai encore un exemple, dont j'ai parlé à la conférence d'il y a deux ans. Nous avons l'habitude de la superposition dans les champs électromagnétiques, mais souvent on comprend mal ce que c'est qu'un état de superposition dans le cas d'interférences électroniques.

Considérons le type le plus simple d'interféromètre électronique (*fig.* 3).

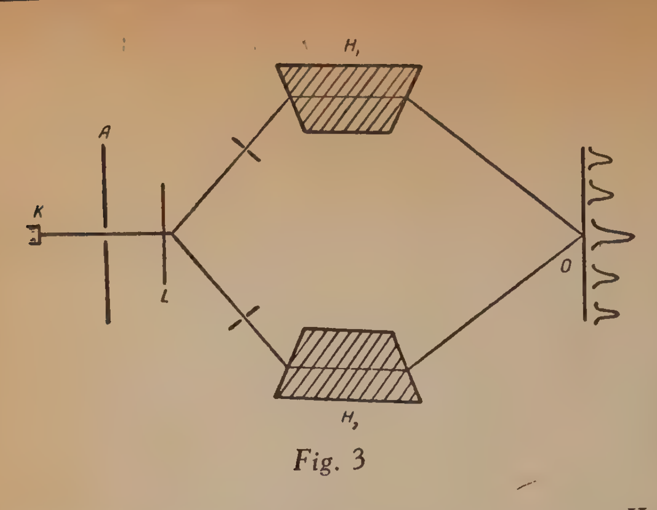


Fig. 3

Les électrons, traversant un champ accélérateur entre K et A, tombent sur une lame cristalline mince L. A l'aide de diaphragmes isolons deux trajets « cohérents » LH_1O et LH_2O de la masse des rayons diffractés en L. Pour réunir ces trajectoires partielles, établissons les champs magnétiques H_1 et H_2 qui rassembleront les rayons diffractés sur l'écran O, sur lequel nous pourrons observer une figure d'interférence. Il y a deux ans, je considérais un tel appareil comme une vue de l'esprit ; à l'heure actuelle, il existe de semblables interféromètres. Ce qui paraît insolite et déconcertant, ce n'est pas le fait même que les électrons interfèrent, mais l'action des champs magnétiques H_1 et H_2 sur les trajectoires « partielles ». En effet, la charge de l'électron ne se trouve jamais que sur l'une de ces trajectoires ! On se demande sur quoi, alors, agit le champ magnétique placé sur le chemin de la trajectoire « vide ». Cette question ne peut recevoir de solution adéquate si les ondes qui interfèrent sont considérées uniquement comme des ondes de probabilité, mais elle reçoit une explication tout à fait satisfaisante du point de vue des champs électroniques quantifiés. Le champ magnétique n'agit pas sur une probabilité, mais sur un champ réel d'électrons-positons. Je pense que le jour n'est pas éloigné où nous serons à même de diriger de puissants flux électroniques en agissant, non pas directement sur eux, mais sur les trajectoires partielles, c'est-à-dire sur le fond d'électrons-positons de Dirac.

Voici encore un exemple qui, à première vue, est en contradiction avec les idées fondamentales de la mécanique quantique. Soit un flux de photons tombant sur un récipient rempli — pour prendre

un exemple concret — de vapeurs de sodium. Si la fréquence de la lumière est celle de la raie de résonance du sodium, sous l'influence des photons incidents il apparaît une résonance optique qui peut très bien être interprétée et calculée à l'aide de considérations quantiques élémentaires : un photon est absorbé par un atome de sodium qui passe dans un état excité et qui, après un certain laps de temps, le réémet ; les directions d'émission des photons par les atomes excités seront tout à fait chaotiques, c'est-à-dire que nous aurons le phénomène habituel de diffusion de la lumière. Mais la situation sera profondément modifiée si on entreprend d'augmenter considérablement la densité des vapeurs de sodium. La quantité de lumière diffusée diminuera nettement au profit de la lumière réfléchie normalement. Si la tension de vapeur est suffisamment importante, les vapeurs réfléchiront « métalliquement », c'est-à-dire normalement, pratiquement toute la lumière incidente et la réflexion normale sera sélective, c'est-à-dire qu'elle n'existera que pour une étroite bande de fréquences.

Comment comprendre ce phénomène si on se place du point de vue des conceptions quantiques habituelles ? En effet, chaque atome absorbe un photon et puis le libère dans une direction arbitraire ; d'où viendra, alors, la réflexion normale ? Apparemment, la solution de ce problème n'est encore une fois possible que dans le cadre de l'électrodynamique quantique. Dans le cas où la distance moyenne entre les oscillateurs virtuels est inférieure à la longueur d'onde de la lumière, ces oscillateurs créent en commun les mêmes conditions aux limites pour les photons incidents que celles que présente un miroir métallique ; il se produit une réflexion sélective sans processus intermédiaire d'excitation et d'émission secondaire.

Nous avons donné tous ces exemples, dont on pourrait à volonté accroître le nombre, pour montrer que tous les processus liés au mouvement des objets individuels du monde microscopique — photons, électrons, etc., — représentent toujours des processus dynamiques complexes et que l'examen de maints problèmes relativement simples aboutit, si on se place du point de vue de la théorie non relativiste, non pas à des difficultés de calcul, mais à des difficultés gnoséologiques. On peut toujours faire les calculs, mais il est souvent très difficile de comprendre le sens physique des résultats obtenus si on reste dans le cadre de la mécanique quantique habituelle.

Les propriétés des objets du monde microscopique se manifestent dans leur interaction avec le monde qui les entoure. Peut-on par-

ler des propriétés de l'électron sans tenir compte de son interaction avec les autres objets ? Cela me semble impossible, car il n'existe pas d'objets isolés. Peu après 1930, l'étude des micro-objets isolés était tenue pour légitime. Pourquoi, en effet, ne pas se représenter l'électron en mouvement comme infiniment éloigné de tous les autres objets microscopiques et macroscopiques ? A l'heure actuelle, après la découverte d'un fait de la plus haute importance, que nos philosophes n'ont pas encore suffisamment compris, la découverte qu'il n'existe pas de vide, c'est-à-dire d'espace privé de matière, une telle étude est devenue impossible. L'atome totalement « isolé » se trouve, en réalité, en interaction dynamique constante avec le « vide physique », champ d'oscillations de zéro, champ de charges fluctuantes. L' « isolement » s'est avéré une abstraction ne correspondant pas à la réalité et il doit être totalement rejeté comme anti-scientifique.

A ce propos, il est nécessaire de faire une remarque. Il me semble que les divergences d'opinions si nettes qui, jusqu'à maintenant, existent entre les physiciens soviétiques qui se tiennent sur des positions matérialistes et les philosophes soviétiques, qui se tiennent également, sans aucun doute, sur des positions matérialistes, sont déterminées par le fait que les uns aussi bien que les autres tiennent la théorie quantique actuelle pour une sorte de système achevé, fermé (les théoriciens ajoutent souvent « et un système sans contradictions internes »). La mécanique quantique, avec son principe de complémentarité, avec son interprétation purement probabiliste de la fonction ψ, ayant pris forme après 1930 dans un domaine très complètement développé de la physique, a affaire à des processus non relativistes. Là résident ses limites et son défaut principal. On peut entendre souvent affirmer que cette mécanique quantique est « juste à l'intérieur de son domaine », à savoir celui où E est beaucoup plus petit que mc^2. Mais alors, il serait également légitime d'affirmer que la théorie de la relativité ne s'applique qu'aux processus dans lesquels il intervient des vitesses de l'ordre de celle de la lumière. Cependant, tous les physiciens protestent contre le fait de donner à la théorie de la relativité le nom de théorie des mouvements rapides, car ils estiment que la théorie de la relativité donne infiniment plus que les équations du mouvement des particules relativistes. C'est seulement grâce à la théorie de la relativité qu'on est parvenu à établir la liaison interne qu'il y a entre les champs magnétiques et les champs électriques, rapport qui persiste également pour de petites vitesses. La célèbre relation $E = mc^2$, qui a été la base de l'énergétique nucléaire, ne contient

bsolument pas la vitesse de la particule. La mécanique quantique on relativiste ne peut pas ne pas contenir des éléments qui, de par eur nature, relèvent d'un autre domaine, c'est-à-dire de l'électrodynaique quantique. Tout processus d'interaction quantique des particules lémentaires, des atomes ou des molécules avec un champ électromanétique relève, en toute rigueur, du domaine de la théorie quantique es champs, puisque, dans ces processus, il est indispensable de onsidérer un système quantifié : l'atome et un champ électromagnéique quantifié. Tous les processus liés à l'apparition ou à l'absorpion de photons relèvent, en toute rigueur, du domaine de la mécanique uantique relativiste. Et la notion de corps isolé est absolument trangère à cette dernière. La mécanique quantique non relativiste a ejeté la notion d' « isolement » en vertu du fait que les propriétés d'un ystème quantique élémentaire sont connues à travers son interaction vec les appareils de mesure ; la mécanique quantique relativiste monre que tout système quantique élémentaire est une sorte de formation dynamique à l'intérieur d'un système quantique très vaste qui est la uperposition de champs électromagnétiques, de champs d'électronspositons, de champs mésoniques et nucléoniques, avec lesquels le système étudié est en interaction dynamique constante. L' « espace vide » s'en est allé dans le royaume des mythes, comme s'en est allé dans celui de la légende, par exemple, l'éther élastique du milieu du XIXe siècle. Le vide physique manifeste des propriétés déterminées, appelées fluctuations de charges et de courants. La valeur moyenne de celles-ci croît avec la diminution du domaine d'espace-temps défini par les interactions ou les mesures.

La découverte des propriétés du vide physique n'a pas fait sensation ; elle s'est faite progressivement et insensiblement au cours de vingt années ; il se peut que ce côté progressif et que le caractère excessivement mathématique de tous les exposés de cette nouvelle branche de la physique aient eu pour conséquence que nos philosophes n'ont pas accordé suffisamment d'attention au fait que, précisément, cette branche, avec ses conceptions absolument nouvelles, a une profonde signification philosophique, transforme nos idées physiques sur l'espace, le temps et la matière. Nous ne connaissons pas un seul travail d'un philosophe soviétique dans lequel soit étudiée la question de ces transformations capitales de nos idées sur l'espace.

Historiquement, la question de la « transformation de l'espace en objet physique », de l'attribution à ce dernier de certaines formes « substantielles » est apparue dans les travaux de Dirac en 1928, tra-

vaux dans lesquels était introduit la notion d'un « fond d'électrons » à énergies négatives. La majorité des physiciens et des philosophes n'a pas pris cette idée suffisamment au sérieux, et a considéré ce fond comme une méthode formelle derrière laquelle il n'y avait aucune réalité. La découverte des « positons » prédits par Dirac a peu modifié cette attitude sceptique, étant donné que les paires positons-électrons naissent, non pas dans n'importe quel point de l'espace, mais seulement dans le voisinage des noyaux des atomes. Cependant, la tentative faite en vue de résoudre l'un des problèmes les plus simples de la mécanique quantique — l'interaction d'un système quantique avec un champ électromagnétique — a abouti à l'apparition d'un nouveau fond, celui de photons virtuels. Le fait est que la mécanique quantique doit considérer, non pas simplement un champ électromagnétique, mais un champ électromagnétique quantifié qui est engendré par la décomposition du champ en série de Fourier. Les ondes monochromatiques de cette décomposition sont équivalentes à un ensemble d'oscillateurs harmoniques quantifiés dont chacun peut posséder une énergie $h\nu$, et l'énergie du champ électromagnétique se trouve être égale à

$$\sum Nh\nu + \sum \frac{h\nu}{2},$$

où N est le nombre de photons. Même pour $N = O$, l'énergie du champ n'est pas égale à zéro, et tout l'espace se trouve être rempli par un fond d'oscillations de zéro

$$\sum \frac{h\nu}{2}$$

dans les régions de l'espace comparables à la longueur d'onde électronique h/mc. Les moyennes des champs électriques et magnétiques, prises sur un tel volume, ne seront pas égales à zéro. Plus la région de l'espace choisie est petite, plus les fluctuations du champ électromagnétique sont grandes. Dans des domaines suffisamment petits, l'énergie des photons virtuels $h\nu/2$ se révèle suffisante pour créer des paires électrons-positons qui, à leur tour, provoqueront l'apparition de fluctuations de charge et de courants augmentant à mesure que devient plus petit le domaine choisi de l'espace. La nécessité d'introduire la notion de « fond » est devenue claire dans le milieu des années trente, mais on ne s'est mis à s'intéresser vraiment sérieusement, comme à une certaine réalité,

x propriétés caractéristiques du vide qu'après les premiers travaux périmentaux de Lamb qui confirmaient avec une très grande pré-sion les calculs théoriques de J. Schwinger. La théorie de P. Dirac, es années 1928-1930, ne pouvait prédire l'effet des fluctuations sur s niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène, étant donné ı'elle considérait l'électron comme une formation ponctuelle atique. Le remplacement de l'électron ponctuel, sans structure, par ı système dynamique a conduit à examiner les processus d'émis-on et d'absorption ininterrompue par l'électron de quanta de lu-ière. Ces processus d'émission et d'absorption de photons sont consi-érés par la physique théorique actuelle comme des processsus « vir-ıels », étant donné qu'ils se produisent en des laps de temps si ɔurts qu'il n'y a aucune possibilité expérimentale de les observer irectement. Cette impossibilité d'observer directement des proces-ıs virtuels a eu pour conséquence que la majorité des physiciens consi-èrent ces processus comme un procédé mathématique particulier der-ère lequel il n'y a pas de réalités bien définies. Il me semble qu'à e propos nous assistons à une répétition de l'histoire. Le fond élec-onique, on l'a également considéré comme un procédé mathéma-que dépourvu de réalité, jusqu'à la découverte de la création de aires électrons-positons. Le fond de fluctuations du champ électro-ıagnétique fut également considéré comme inobservable par prin-ipe jusqu'à la découverte de l'effet Lamb et du moment magnétique nomal de l'électron. La négation de la réalité des transitions vir-uelles est, à mon avis, un tribut payé aux conceptions positivistes de W. Heisenberg. De toutes façons, une sérieuse objection contre la éalité des processus virtuels réside dans la formulation de la loi de conservation de l'énergie, loi qui doit être, non pas évidemment emise en cause, mais précisée, compte tenu de l'énergie des vibra-ions de zéro. Le développement actuel de la physique a eu pour conséquence l'adoption d'un point de vue matérialiste sur l'espace considéré comme inséparable de la matière ; mieux, les propriétés de l'espace se sont révélées dépendre des dimensions du domaine étudié ; les propriétés des domaines macroscopiques de l'espace ne sont pas la somme des propriétés des régions microscopiques.

Il ne fait pas de doute que le schéma des processus virtuels, que l'électrodynamique quantique actuelle utilise de façon si large et si féconde, subira, au cours de son développement, des transformations considérables, mais il me semble que la variation de la valeur moyenne de l'énergie potentielle du champ coulombien entre proton

et électron — confirmée expérimentalement dans le phénomène de déplacement des niveaux *s* de l'atome d'hydrogène — montre la réalité des processus virtuels. L'existence d'un fond de vibrations de zéro lève, à mon avis, une très grande difficulté philosophique, relative à la théorie de la connaissance.

Comme on le sait, à propos de l'interaction de systèmes atomiques quantifiés avec un champ de rayonnement, il convient d'introduire la notion de transitions induites par résonance et de transitions spontanées des niveaux excités aux niveaux fondamentaux. Si l'on admet qu'il n'existe pas de transitions spontanées, la loi d'émission de Planck devient incorrecte. La mécanique quantique non relativiste, tout en calculant les probabilités de ces transitions, ne dit rien des causes des processus spontanés. Pourtant, il est aisé de montrer que ces processus spontanés sont entièrement déterminés par l'interaction des atomes excités avec le champ de vibrations de zéro. Le fait de tenir compte de cette interaction avec les fluctuations du champ électromagnétique non excité ne peut aboutir à une formule qui prévoirait d'une façon précise — et non pas schématique — le moment du passage de l'atome de l'état excité à l'état fondamental, mais il donne la *cause* qui provoque la transition quantique. La transition à l'état fondamental devient statistiquement déterminée, de la même façon que les autres excitations. Elle est déterminée, grosso-modo, par la « collision » de l'atome excité avec un « photon non excité » $h\nu/2$.

Ce résultat, connu depuis l'établissement des fondements de la mécanique quantique relativiste, présente, me semble-t-il, un grand intérêt philosophique. On a un système quantifié — un atome en état excité ; en l'absence de champs électromagnétiques externes (absence de photons) cet atome peut rester dans son état excité en moyenne τ secondes. La mécanique quantique non relativiste ne se borne pas à ne pas fournir de réponse à la question de savoir grâce à quel mécanisme interne ou externe peut s'effectuer la transition de l'état excité à l'état fondamental. Bien plus, elle considère qu'une telle question sur la cause est dépourvue de sens physique car elle est, par essence, une théorie statistique et il est aussi impossible de poser des questions sur les causes d'une transition quantique que, dans des expériences de diffraction, sur les causes de l'arrivée d'un photon en tel point plutôt qu'en tel autre point voisin. L'interaction de l'atome excité avec le fond de fluctuation des vibrations de zéro met en évidence la cause de la transition, sans

liminer le caractère statistique de tout le phénomène. Les sérieuses iscussions de principe qui ont lieu à propos de la causalité dans la iécanique quantique se résument, me semble-t-il, en ce qui suit.

Soit un système quantique absolument isolé : à quelles lois obéit e système — à des lois statistiques ou à des lois absolument déter- iinées ? La mécanique des quanta donne à cette question une ré- onse tout à fait péremptoire : toutes les lois auxquelles obéissent les iicro-objets sont statistiques. Mais alors, la question suivante est out à fait légitime : à quoi est dû le caractère statistique des lois qui égissent un micro-objet isolé, disons un proton ou un électron ? La iécanique quantique non relativiste estime cette question dépourvue e tout sens physique. D'autre part, de nombreux physiciens expéri- ientateurs, ainsi que des philosophes, estiment que, si l'on admet le aractère statistique interne du comportement d'un objet isolé du ionde microscopique, on aboutit au « libre-arbitre » de ces particules. Ce n'est pas la question du caractère statistique, mais de la *cause* de e dernier qui est importante du point de vue gnoséologique.

Il peut y avoir les points de vue suivants :

1. Toutes les lois de la physique sont, de par leur nature, statis- iques et la loi statistique est la forme supérieure de la détermination. l est inutile de rechercher les causes provoquant le caractère statis- ique, car elles n'existent pas.

2. Le caractère statistique est provoqué par des « paramètres cachés », c'est-à-dire par l'ignorance des conditions initiales exactes. Une description absolument déterminée (dans l'esprit de Laplace) est, en principe, tout à fait possible. C'est le point de vue bien connu de D. Bohm et, apparemment, de L. de Broglie.

3. Le caractère statistique du comportement des micro-objets est provoqué par leur interaction avec des champs non excités. Les micro-objets sont l'état d'excitation des champs, aussi est-il impossible de leur attribuer des propriétés grossièrement corpusculaires. Le comportement des micro-objets est déterminé dans une large mesure par leur interaction avec les champs qui les ont produits ; ces derniers, représentant une superposition de processus ondulatoires, donneront inévitablement naissance à des interactions fluctuantes.

Ce point de vue n'élimine pas le caractère statistique, mais en montre la cause. De même que la théorie du mouvement brownien, sans prédire des résultats précis, il montre les causes du comportement statistique des systèmes quantiques.

De ces trois hypothèses, seule la première a été l'objet d'un déve-loppement fort poussé, c'est celle qui est exposée, tantôt ouvertement, tantôt avec plus de discrétion, dans tous les cours de mécanique quan-tique. La seconde rencontre des objections sérieuses parce que, d'une façon générale, elle n'est développée que pour la mécanique quan-tique non relativiste. Elle ne m'est pas très sympathique parce qu'elle développe des notions purement corpusculaires, tout en y ajoutant l'existence d'un « champ quantique ».

C'est le troisième point de vue qui me plaît le plus, mais il n'a absolument pas été développé en un système harmonieux et apparem-ment il ne le sera jamais, car son auteur, c'est-à-dire moi-même, n'étant pas théoricien, se souvient du vieux père Krylov[2] qui déclarait qu « c'est un malheur si le savetier se mêle de cuire des gâteaux » et l'expérimentateur ... d'élaborer une théorie...

Aussi le problème de l'essence du caractère statistique du compor-tement des micro-objets se trouve-t-il dans une situation bien peu satis-faisante. Peut-être les camarades philosophes me persuaderont-ils, au cours de la discussion, que le premier point de vue n'est pas en con-tradiction avec la conception du monde matérialiste. Qu'ils ne me comprennent pas de travers, je ne voudrais pas et je ne réclame pas un déterminisme laplacien, mais je veux voir la *raison d'être*[3], la cause qui conduit un atome excité à émettre un photon, non pas à ce moment-ci, mais à ce moment-là, et l'électron à tomber en ce point-ci, et non pas en ce point-là de l'écran.

Je voudrais, pour conclure mon rapport, attirer l'attention sur ce fait curieux que les prophètes du positivisme, les disciples de l'école de M. Born, N. Bohr et W. Heisenberg, ont totalement rendu leurs positions en ce qui concerne l'une des questions les plus essentielles. Comme on le sait, pendant la période de plus de vingt ans qui s'est écoulée depuis la naissance de la mécanique quantique, ces positivistes se sont battus pour écarter de la théorie toutes les grandeurs dites non observables, qui devaient être remplacées par des grandeurs di-rectement mesurables. Effectivement, les premiers succès de la méca-nique quantique coïncidaient avec le rejet hors de la théorie de l'atome de grandeurs telles que les trajectoires orbitales définies des électrons. Ce fait, en grande partie fortuit, les positivistes s'ingénièrent à le présenter comme un principe philosophique déterminé et comm

2. I.A. Krylov (1769-1844), fabuliste russe (*N.d.T.*).
3. En français dans le texte (*N.d.T.*).

un programme qui, présumait-on, aiderait au développement ultérieur de la théorie. Ainsi que vous le savez, ce principe s'est complètement effondré, encore que les prophètes du positivisme n'en soufflent mot ouvertement. Mais il est difficile de s'attendre à ce que W. Heisenberg se livre au grand jour à une autocritique de ses positions philosophiques. En fait, la science a emprunté un tout autre chemin et la théorie contemporaine des champs quantiques est remplie de grandeurs qui ne sont directement ni observées ni mesurables, y compris tous les schémas de processus virtuels .

K.D. SINELNIKOV.

О философских вопросах современной физики; recueil *Problèmes philosophiques de la physique moderne*, Editions de l'Académie des Sciences d'Ukraine, Kiev 1956, pp. 7-26.

Traduit par Jean STABUSCH.

A PROPOS DE LA THEORIE DU COMPORTEMENT DES MICRO-OBJETS INDIVIDUELS[1]

> Je suis convaincu qu'en renonçant à la conception déterministe, nous priverions la science de son ressort essentiel, de ce qui a fait jusqu'ici sa force et son succès, la confiance dans l'intelligibilité du monde. Rien dans les difficultés actuelles ne justifie ou n'impose un changement d'attitude qui équivaudrait, selon moi, à une abdication. Paul LANGEVIN.

Au cours des dernières années, la question de l'interprétation de la mécanique quantique a soulevé des controverses qui ne sont pas restées cantonnées au milieu étroit des physiciens théoriciens. Il n'y a là rien que de très naturel, car cette question dépasse de loin les bornes de la physique et soulève des problèmes fondamentaux relatifs à la structure de la réalité physique, à la nature et au comportement des phénomènes, au mécanisme réel de l'expérimentation et à la valeur de la connaissance elle-même. En fait, c'est sur le terrain de la mécanique quantique que se livre aujourd'hui l'un des épisodes les plus importants de la bataille idéologique entre le matérialisme et l'idéalisme.

Avant d'aborder la discussion proprement scientifique, je voudrais faire quelques remarques préliminaires. En premier lieu, et comme on

1. Un grand nombre de points traités dans cet article ont déjà été présentés séparément au public français dans diverses publications. Ils ont été rassemblés ici à l'usage du public soviétique, en vue de lui donner un aperçu d'ensemble de la question; cet exposé contiendra donc pour le lecteur français un certain nombre de redites dont l'auteur s'excuse à l'avance.

sait, l'apparition et le développement de l'interprétation probabiliste de la théorie des quanta a coïncidé avec un renouveau de la philosophie idéaliste. Un très grand nombre d'auteurs et d'idéologues de la bourgeoisie se sont en effet précipités sur cette aubaine : la confirmation apparente de certaines thèses idéalistes fournie par l'interprétation des découvertes les plus récentes dans le domaine de la microphysique.

Certains physiciens et philosophes idéalistes s'appuient sur l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique de Bohr, Pauli et Heisenberg pour développer des conceptions empiriocriticistes sur la nature de la connaissance. Ils tirent parti de l'insuffisance des conceptions mécanistes classiques au niveau des microphénomènes pour ériger en dogme l'impossibilité de comprendre rationnellement la nature. Ils interprètent abusivement l'échec des lois classiques dans ce domaine de phénomènes comme un argument définitif contre le matérialisme. Ils développent une conception de la nature qui, comme l'a souligné M. Louis de Broglie, « conduit logiquement à une sorte de subjectivisme apparenté à l'idéalisme dans le sens philosophique du mot, et essaie de nier l'existence de la réalité physique indépendante de l'observateur. »

En second lieu, cette offensive de l'idéalisme revêt une importance considérable tant sur le plan philosophique que sur le plan politique. C'est ainsi que l'abondante littérature spécialisée à caractère pseudo-scientifique destinée aux milieux intellectuels, les œuvres de M. Reichenbach aux Etats-Unis ou celles de M. Destouches en France, se double d'une véritable propagande de masse dirigée contre le matérialisme. Voici quelques exemples : en Angleterre, au cours de l'année dernière, plusieurs émissions télévisées ont été consacrées à la complémentarité, au cours desquelles le professeur Oppenheimer a justifié la croyance au surnaturel au nom de la physique la plus moderne.

Il y a peu de temps, un journaliste, M. Servan-Schreiber, expliquait gravement qu'un des aspects de la lutte entre les deux camps qui se disputent l'avenir du monde se joue sur le terrain de la lutte entre le déterminisme et l'indéterminisme en physique puisqu'il soulève celui de l'existence des lois objectives dans la nature et la société.

En France, la grande majorité des professeurs de philosophie des lycées transmettent les idées de Bohr à leurs élèves, sans aucun esprit critique et il n'est pas de manuel d'examen qui ne contienne quelques phrases sur « la faillite du déterminisme au niveau de l'atome ». A ce

point, l'indéterminisme se dégrade en slogans vulgaires qui, sur un terrain soi-disant scientifique, ouvrent une voie dangereuse qui peut être facilement utilisée par les pires variétés de l'idéologie réactionnaire.

L'objet de cette étude est de montrer la fausseté de cette base scientifique. Avant de traiter cette question, rappelons quelques éléments historiques relatifs au développement de l'idéologie indéterministe et empiriocriticiste de l'école de Copenhague.

Il est bien connu que cette théorie, née pour l'essentiel il y a vingt-cinq ans, n'a pas été sans rencontrer de très vives résistances parmi les plus grands physiciens de l'époque.

Il suffit de rappeler l'attitude très ferme des deux fondateurs de la théorie de la relativité, Lorentz et Einstein, et celle des deux principaux artisans, avec Bohr, de la théorie des quanta, Max Planck et Louis de Broglie. On sait que ce dernier vint proposer au congrès Solvay, en 1927, une première version de sa théorie déterministe de la « double solution » et que les critiques unanimes et passionnées qui lui furent adressées l'amenèrent à se rallier, bien que sans conviction, au courant dominant. En fait, tous ces savants, poussés par l'intuition juste que la théorie de Bohr était irrationnelle, mais attachés à une forme de pensée métaphysique, à un matérialisme non explicite et insuffisamment approfondi, ne surent pas défendre leurs positions victorieusement ; et le congrès Solvay marqua le triomphe des idées de Bohr-Pauli-Heisenberg qui, durant de longues années, ne devaient plus être sérieusement mises en péril.

La nouvelle théorie a ouvert des voies fécondes et a permis des progrès décisifs en physique[2]. Et si les physiciens rationalistes ont été battus, c'est avant tout parce qu'ils n'ont pu opposer à ces succès une autre théorie cohérente et valable.

La mécanique quantique, à travers un formalisme abstrait mais rigoureux et élégant, unifiait les principaux domaines de la physique : la physique corpusculaire et la physique ondulatoire, la mécanique classique et la mécanique des microprocessus. L'aventure de Dirac édifiant des équations d'onde de telle sorte qu'elles satisfassent

2. A ce propos, je tiens à protester contre une caricature de la positio des partisans de l'interprétation causale qui tend à les présenter comm niant ou sous-estimant l'apport scientifique de l'école de Copenhagu Ce serait là une position absurde. Par rapport à l'ancien mécanisme, ell a introduit dans la science des notions, des méthodes et des résultats qu peuvent être considérés comme définitivement acquis. Mais ceci ne signifi pas qu'à d'autres égards, elle n'ait pas joué le rôle de frein et qu'il faille pas combattre ses aspects négatifs.

l'invariance relativiste ; tombant comme par hasard sur l'interprétation du spin déjà postulée empiriquement par Uhlenbeck et Goudsmit ; découvrant par le calcul les niveaux d'énergie négative et en déduisant la possibilité d'existence des positons (mis en évidence ensuite par l'expérience), reproduit la prouesse de Leverrier découvrant Neptune. De tels succès ne pouvaient être interprétés par les physiciens de bonne foi, quelles que fussent leurs tendances idéologiques, que comme des preuves éclatantes de la justesse de la théorie.

Il est inutile de rappeler toutes les découvertes dont la physique est redevable à la mécanique quantique, mais il convient de bien les garder présentes à l'esprit quand on veut étudier l'évolution des forces dans la lutte idéologique en physique. A la vérité, en 1930, les adeptes de Bohr ont eu de leur côté la force principale, celle qui l'emportera toujours sur ce front de lutte : une théorie permettant le progrès scientifique. C'est là ce qui explique que les conditions probabilistes aient influencé et même dominé tant de savants résolument progressistes du monde capitaliste et aient été adoptées par un grand nombre de savants soviétiques.

Si on veut mener une offensive contre l'indéterminisme, il ne faut jamais oublier que les succès de la mécanique quantique ont été portés à son crédit. Il faut savoir qu'on sera inévitablement repoussé tant qu'on n'apportera pas d'abord une théorie équivalente, c'est-à-dire qui expliquera avec au moins autant de précision et de cohérence les mêmes faits d'expérience que la mécanique quantique. On ne pourra vaincre que si on apporte une nouvelle théorie qui explique plus de faits et qui les explique mieux.

Remarquons enfin qu'il serait extrêmement intéressant, du point de vue de l'histoire de la philosophie, d'entreprendre de façon précise l'histoire de l'influence exercée par l'idéologie empiriocriticiste et idéaliste sur l'évolution des idées physiques et sur l'histoire de la philosophie dans cette période. Il faut bien voir, en particulier, le parti qu'ont su tirer les idéologues de la réaction de l'échec pratique et des contradictions philosophiques où se débattaient les partisans du matérialisme mécaniste, successeurs de Laplace et de Lord Kelvin. En l'absence de défenseurs du matérialisme dialectique dans ce domaine, les tenants du matérialisme mécaniste ne pouvaient résister à la dialectique idéaliste des partisans de l'école de Copenhague. Il est incontestable que le point de vue de cette école était infiniment plus riche que le point de vue mécaniste et qu'il a trompé de nombreux physiciens progressistes qui ont vu, en toute bonne foi, dans l'idée de complémentarité, un pas vers une conception dialectique de la nature

de la matière. Il serait évidemment tout à fait faux de considérer comme des adversaires politiques et idéologiques l'ensemble des physiciens qui soutiennent encore aujourd'hui l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique. Cette école, en effet, a pris bien soin de camoufler ses fondements idéologiques véritables et présente au public des physiciens un visage à facettes multiples, propre à satisfaire toutes les opinions. A côté d'idéalistes déclarés comme Heisenberg, on trouve des savants progressistes (comme le professeur Rosenfeld) qui défendent l'idée que la complémentarité représente le nec *plus ultra* de la dialectique matérialiste. Cette dernière tendance s'efforce de persuader les physiciens et les étudiants progressistes que l'idéologie empiriocriticiste est parfaitement compatible avec le matérialisme dialectique.

Du reste, le principal porte-parole de la nouvelle école, le professeur Niels Bohr, prend bien soin, en général, de ne pas se compromettre ouvertement sur le plan philosophique, ce qui risquerait d'ouvrir des controverses nuisibles au quasi-monopole philosophique exercé par les partisans de l'indéterminisme dans le domaine des sciences physiques. A de rares occasions Bohr, il est vrai, a reconnu qu'il s'était inspiré de la philosophie de Kierkegaard, mais, dans l'immense majorité des cas, les grands partisans de l'école de Copenhague soutiennent que la complémentarité et l'indéterminisme résultent d'une appréciation purement scientifique du comportement des microphénomènes et qu'aucune *autre* alternative n'est possible. Il a fallu la critique serrée des physiciens soviétiques et des partisans de l'interprétation causale pour leur faire reconnaître qu'il n'en était pas ainsi et que des réinterprétations matérialistes et déterministes étaient parfaitement possibles.

En dehors d'irréductibles comme Einstein et Planck, il s'est trouvé dès le début des savants progressistes pour commencer à préparer la contre-offensive contre l'indéterminisme, sur la seule base possible, celle du matérialisme dialectique. Nous voudrions seulement rappeler la position bien connue du grand savant marxiste français Paul Langevin. Langevin admettait la validité de la mécanique des ensembles quantiques et du formalisme de la mécanique quantique, mais en rejetait l'interprétation probabiliste et subjectiviste. Pour lui, un micro-objet devait pouvoir être caractérisé par d'autres paramètres obéissant à des lois déterministes objectives, permettant d'en construire une image fondamentalement différente qui, moyennant une représentation convenable, pourrait être objective et déterministe.

Naturellement, dans l'esprit de Langevin, ceci constituait simplement une hypothèse de travail qui devait promouvoir tout un programme de recherche pour trouver effectivement une représentation mathématique du modèle déterministe. Malheureusement cette recherche n'a pas sérieusement été entreprise. Pour trop de marxistes français (et c'est encore le cas aujourd'hui, comme en témoigne un article récent du camarade Lurçat paru dans *la Nouvelle Critique*[3]), la conception de Langevin joue simplement le rôle d'un alibi. Puisque Langevin a dit qu'il devait exister un modèle déterministe rendant compte de la mécanique probabiliste du micro-objet individuel, nous pouvons donc sans remords continuer à utiliser et à développer cette mécanique côte à côte avec les savants idéalistes, laissant à d'autres le soin de découvrir ce modèle. L'interprétation de Bohr constituant en somme une « écume philosophique » dont on se débarrassera ultérieurement sans difficulté. A mon avis, il y a là une grave sous-estimation du rôle des interprétations philosophiques dans la science. Ce rôle est très important. Les interprétations, en effet, exigent des démarches scientifiques différentes qui conduisent tôt ou tard à des résultats scientifiques différents, entre lesquels les faits permettront de choisir. Ainsi, l'interprétation matérialiste de Dalton et l'interprétation positiviste de Berthelot pour les lois des combinaisons chimiques différaient réellement parce qu'elles ont donné naissance à deux systèmes chimiques différents : le système positiviste des « équivalents », stérile et qui a sombré dans l'oubli, et le système matérialiste des atomes qui est devenu la base de tout progrès ultérieur.

En utilisant la position de Langevin, non pour s'efforcer de trouver un modèle déterministe, mais pour se justifier de continuer à développer pratiquement la théorie de l'école de Copenhague, nos camarades adoptent en fait la même attitude que les physiciens positivistes caractérisés plus haut ; car leurs calculs, les formules qu'ils emploient, leurs directions de recherches sont exactement les mêmes que ceux des positivistes. Le vernis matérialiste qu'ils ajoutent à leur travail constitue un simple ornement verbal, jouant finalement le rôle d'un camouflage.

Les interventions, en 1947, des savants soviétiques contre le positivisme et l'indéterminisme de l'école de Copenhague, ont engendré un courant qui s'est développé sans interruption dans le sens indiqué par les physiciens soviétiques, notamment Blokhinzev et Terletski.

3. No 62, février 1955 (*N.d.l.R.*).

On peut résumer ainsi leur point de vue :

1° — Bohr et Heisenberg considèrent abusivement la mécanique quantique comme une théorie des micro-objets individuels. En réalité, la mécanique quantique est seulement applicable aux ensembles statistiques de micro-objets très nombreux. La « fonction d'onde » de la mécanique quantique représente convenablement le comportement d'un *ensemble* de micro-objets identiques, apparaissant soit simultanément, soit dans une série d'expériences consécutives. Cela est dû à ce que la mécanique quantique dans son état actuel ne permet de calculer que les valeurs *possibles* des différentes grandeurs physiques et les *probabilités* de tel ou tel état physique, ou les *probabilités de transition* d'un état à un autre. La connaissance de la probabilité d'un état donné ne donne pas de renseignements complets sur son état véritable et, par conséquent, la description donnée par la mécanique quantique à l'aide d'une fonction d'onde ne représente pas entièrement l'état de l'objet.

2° — La possibilité de résoudre au moyen de la fonction d'onde les problèmes relatifs aux ensembles quantiques de micro-objets est due à ce que les micro-objets individuels qui les constituent existent indépendemment de toute observation et obéissent à ce que Langevin appelait des lois « définies et descriptibles ».

3° — Il est possible de se forger une représentation déterministe de ces micro-objets individuels qui rende compte à la fois du comportement individuel réel de ces micro-objets, et des propriétés objectives des ensembles statistiques de tels objets. Ce « modèle » devra tenir compte des aspects corpusculaire et ondulatoire présentés par les microprocessus.

Cette intervention venait à son heure. En 1947, vingt ans après le congrès de Bruxelles, il devenait évident aux yeux de tous les physiciens que la mécanique quantique était entrée dans une période de crise. Les difficultés, les échecs, les piétinements, les paradoxes s'accumulaient et n'ont fait qu'empirer depuis. La théorie conduit dans plusieurs cas à des « intégrales divergentes », c'est-à-dire que lorsqu'on calcule certains effets, tels que par exemple la « self-énergie » d'un électron, on est conduit à des valeurs infinies, manifestement absurdes. Les procédés introduits par les physiciens pour éviter tant bien que mal ces conclusions en « coupant » une partie du domaine d'intégration, sont très artificiels et nullement satisfaisants. D'autre part, l'étude des rayons cosmiques et le développement de la physique nucléaire font apparaître un foisonnement de nouvelles particules élémentaires. Alors que jusque vers 1940 on avait abouti à une simplification progressive, à une réduction du nombre de particules

constituant la matière, on voit au contraire ces particules se multiplier jusqu'à atteindre le nombre d'une vingtaine. Dans le cadre de la mécanique quantique, cela crée des difficultés inextricables pour rendre compte de leurs interactions et de leurs transformations les unes dans les autres.

Enfin, il devient évident que toute tentative pour édifier sur la base de la mécanique quantique une théorie du noyau autre que purement phénoménologique se heurte à un insuccès persistant, ce qui est très grave au regard du développement fécond de la physique nucléaire expérimentale. Toutes ces difficultés présentent un aspect commun : elles montrent que l'investigation de la matière menée sur la base de la mécanique quantique n'est valable que tant que les domaines de l'ordre de 10^{-13} cm. peuvent être considérés comme ponctuels. A des distances plus petites, ses concepts fondamentaux cessent d'être adéquats, si bien qu'une refonte complète de la théorie paraît nécessaire, semblable à celle par laquelle la mécanique quantique elle-même a remplacé — et englobe — la mécanique macroscopique [4].

*

Ayant ainsi posé le problème, et avant d'exposer les propositions concrètes élaborées par M. de Broglie, Bohm et moi-même, je voudrais faire quelques remarques générales sur l'orientation des recherches possibles.

Toute tentative pour considérer la théorie quantique comme un système clos qu'il est impossible de dépasser revient en fait à reprendre à son compte les positions de Niels Bohr et à poser une limite ultime à la connaissance, contrairement aux principes essentiels du matérialisme dialectique.

De ce point de vue, je voudrais préciser qu'il n'y a pas à mon avis désaccord entre les physiciens soviétiques (tels Blokhinzev et Terletski) et les partisans de l'interprétation causale. Si l'on rejette en effet les théories idéalistes de l'école de Copenhague qui nient la possibilité de décrire le comportement objectif des micro-objets individuels, il est clair que la tâche des physiciens matérialistes consiste

4. Voir l'article de Louis de Broglie dans *Nuovo Cimento*, no 1, 1955.

à édifier une nouvelle théorie, capable de décrire ce comportement et de fournir comme mécanique statistique les résultats obtenus dans le cadre de la théorie des quanta. En ce sens, l'objectif consiste, non pas à réinterpréter les résultats habituels, mais à édifier une mécanique submicroscopique nouvelle qui nous fournisse une description causale des micro-objets individuels. Si l'on parvient à édifier une telle théorie, on aura bien fourni une « explication » de la théorie des quanta au sens marxiste du mot. Il n'y a aucune raison de s'immobiliser aux résultats actuels et d'affirmer que l'explication matérialiste s'arrête au niveau des phénomènes atomiques. Il y a toutes raisons de croire, au contraire, que les effets quantiques dissimulent des propriétés nouvelles et plus profondes de la matière, qu'il s'agit de découvrir aujourd'hui.

Ceci posé, reste à édifier concrètement cette nouvelle mécanique microscopique. Comme nous l'avons déjà dit, bien des voies sont ouvertes pour le faire. Ni M. de Broglie, ni Bohm, ni moi-même ne prétendons que celle que nous avons choisie est la seule correcte. Il est clair qu'en l'absence de résultats expérimentaux décisifs, on peut concevoir bien des manières d'attaquer ce problème. Tout ce que je peux dire à l'heure actuelle, c'est que notre tentative comporte une description déterministe et logiquement cohérente du comportement des micro-objets individuels qui permet d'expliquer la majeure partie des phénomènes quantiques. Je ne voudrais pas non plus présenter cette théorie comme quelque chose d'achevé, mais comme un point de départ possible pour comprendre d'étape en étape le comportement et les qualités nouvelles de la matière au niveau submicroscopique. Cette théorie est aujourd'hui en plein développement et l'image des micro-objets qu'elle fournit va en se perfectionnant au fur et à mesure qu'elle se développe pour expliquer des propriétés de plus en plus étendues des micro-objets. Il faut donc la juger dans la perspective précédente. Comme toute théorie scientifique, elle vaincra ou tombera en fonction des résultats expérimentaux qu'elle permettra d'interpréter. Du reste, même si elle est correcte, elle ne constituerait jamais qu'une étape dans la marche indéfinie de notre pensée vers une connaissance plus profonde de la matière.

*

Sans aborder l'aspect corpusculaire des microphénomènes, que de nombreux dispositifs (cellules photoélectriques, chambres de Wilson,

ompteurs de particules élémentaires, etc.) permettent de mettre en vidence, arrêtons-nous brièvement sur les expériences connues d'in-erférence de la lumière, qui sont liées à l'aspect ondulatoire des mi-rophénomènes. Cependant, comme nous le verrons plus loin, en plus e l'aspect ondulatoire, l'aspect corpusculaire des processus lumi-eux se manifeste également.

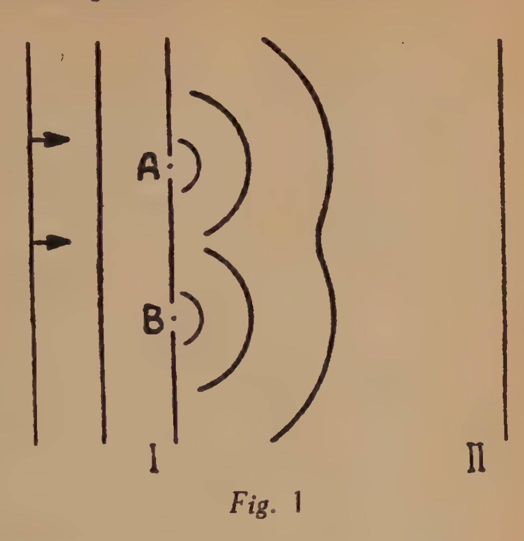


Fig. 1

Considérons deux écrans, I et II, le premier étant percé de deux fentes *A* et *B*. Une onde lumineuse plane tombe sur I. Si *B* seul est ouvert, on obtient une illumination uniforme sur II. Mais lorsque *A* et *B* sont ouverts, on obtient une figure d'interférence sur II, variable avec la forme et l'écartement de *A* et de *B* et qui diffère de la somme des illuminations provoquées par *A* et *B* seuls.

Bien entendu, l'illumination observée sur II est formée par la superposition des effets ponctuels des photons composant le rayon-nement. On peut même s'arranger pour qu'ils apparaissent un à un ; auquel cas la figure d'interférence se constitue progressivement par superposition des taches qui marquent sur II l'action des photons individuels. Cette figure est donc réellement constituée par les contributions indépendantes des photons isolés. Ainsi, sur l'écran II, les photons viennent s'accumuler dans certaines régions (franges blanches), délaissant systématiquement d'autres régions (franges sombres).

Le phénomène est bien expliqué si l'on admet que l'onde plane tombée sur *A* et *B* forme des ondes cylindriques continues centrées

sur A et B. Lorsqu'une seule de ces ondes tombe sur II (par fermeture d'un des orifices), elle engendre une distribution uniforme. Lorsque deux ondes se forment simultanément, elles interfèrent et donnent naissance à la distribution d'interférence. Le résultat qui précède démontre clairement, en plus du caractère corpusculaire, le caractère ondulatoire des phénomènes lumineux.

Observons maintenant notre montage d'interférence dans des conditions où l'on soit assuré de n'avoir pas plus d'un objet à la fois dans l'appareil. Au niveau de II, ce micro-objet se manifeste sous forme corpusculaire. Au niveau de I, il se comporte comme une onde, puisque la distribution de photons individuels isolés sur II est influencée par la présence des deux fentes A et B. Ainsi chaque photon, qui agit en II comme une particule présente individuellement un aspect ondulatoire. Tout se passe comme s'il interférait avec lui-même en I, pour être finalement absorbé de préférence dans les régions où la figure de diffraction présente des maxima.

L'expérience a alors permis de dégager une propriété fondamentale : les aspects particulaires d'un ensemble de micro-objets soumis à une expérience du type précédent se répartissent dans l'espace avec une densité $|\psi|^2$ où ψ désigne une onde continue satisfaisant à l'une des équations linéaires de la mécanique ondulatoire. Par exemple, dans le dispositif qui nous intéresse, la probabilité pour qu'un photon soit présent en un point de l'espace est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde lumineuse qui lui est associée.

De telles propriétés posent évidemment de difficiles problèmes. Elles sont manifestement incompatibles avec les idées habituelles sur la structure des micro-objets. Il s'agit pourtant de comprendre ce qui se passe et d'expliquer en particulier cette espèce d'interférence des objets avec eux-mêmes.

On sait que l'école dite « de Copenhague », dont les promoteurs sont MM. N. Bohr, W. Heisenberg, M. Born, W. Pauli, niant l'existence objective des micro-objets, n'admet pas même l'idée qu'il est possible de construire un modèle, comme base d'une connaissance objective possible des micro-objets.

Pour cette école, la notion classique de connaissance est dépourvue de sens. L'objet de la physique, de son point de vue, n'est pas de décrire le comportement réel des choses, mais uniquement de construire un symbolisme mathématique qui permette de rendre compte des résultats expérimentaux. Toute connaissance extérieure à la mesure est impossible d'après M. Bohr, car les micro-objets ne sont pas descriptibles dans le cadre de l'espace et du temps. Selon ce point

e vue, les micro-objets, suivant la façon dont on les observe, se résentent à l'observateur, soit sous forme de corpuscules, soit sous orme d'ondes (complémentarité) et se comportent en tout « comme es individus mal définis dans des régions finies de l'espace-temps ».

Dans cette conception, il y a donc bien une onde ψ et un coruscule, mais ils ne peuvent se représenter à la manière de la physique lassique. Le corpuscule n'a ni position, ni vitesse, ni trajectoire préise ; il n'en peut acquérir qu'au moment des expériences. Il est donc n général doté simultanément d'une infinité de positions et de vitéses possibles qui s'actualisent dans les mesures avec certaines probailités. L'onde ψ est dépourvue de réalité physique et représente simlement l'ensemble des potentialités expérimentales du corpuscule vec leurs probabilités respectives. Ces ondes constituent des « champs uantiques » dont les propriétés (interaction avec les appareils de mesure) et l'évolution (fournie par les équations d'onde de Schrödinger, Dirac, etc.) épuisent tout ce que nous pouvons savoir des particules qui leur sont associées.

Selon M. Bohr, l'expérience d'interférence précédente doit donc s'interpréter de la manière suivante (lorsque les micro-objets arrivent un à un sur l'appareil de la fig. I).

A gauche de l'écran I, le photon n'a ni position ni trajectoire. Il est représenté par une onde plane continue ψ qui permet de calculer sa probabilité de présence $|\psi|^2$ en chaque point. Au niveau de I, cette onde engendre deux ondes cylindriques en A et B. Après I, ces ondes de probabilité interfèrent et engendrent sur II une figure d'interférence qui représente la distribution des impacts éventuels du photon considéré. Finalement, le photon apparaît sur II en un point qu'il est impossible en principe de déterminer à l'avance. Si on répète alors l'expérience avec un grand nombre de photons associés à des ondes ψ identiques, ils se répartissent bien sur II avec une distribution conforme aux résultats de la figure d'interférence.

Mais, outre l'interprétation donnée par l'école de Copenhague, on peut concevoir au moins deux façons de rendre compte du caractère à la fois ondulatoire et particulaire des micro-objets individuels, sans poser en principe l'impossibilité de les décrire dans le cadre de l'espace et du temps, comme le fait l'école de Copenhague.

Une première manière consiste à supposer que le corpuscule est essentiellement constitué par un phénomène ondulatoire étendu, dénué en général d'aspect particulaire (puisque ce dernier aspect paraît incompatible avec les relations d'indétermination d'Heisenberg). Dans l'expérience précédente, par exemple, les corpuscules individuels, compara-

bles à des ondes étendues, passent simultanément par les fentes A et B. L'aspect corpusculaire ne se manifeste qu'à l'instant des interactions avec l'appareil, ce qui revient à dire que l'énergie se concentre brutalement sur l'écran II au moment de l'interaction. D'une façon plus générale, on pourrait imaginer que l'aspect corpusculaire n'a pas d'existence permanente dans l'onde, qu'il se forme en un point, puis se détruit pour reparaître ailleurs d'une manière analogue aux gouttelettes de brouillard qui se forment et se détruisent dans une vapeur d'eau au voisinage du point critique. Dans ces conceptions, il est évidemment impossible que cet aspect particulaire soit animé de mouvements classiques. Si j'ai bien compris leurs mémoires, c'est un modèle de ce genre que les professeurs Jánossy et Blokhinzev ont eu l'intention de développer. Disons tout de suite qu'un tel comportement des micro-objets individuels est parfaitement plausible, mais que, jusqu'à présent, il n'a pas été possible de fournir une théorie quantitative qui explique pourquoi cet aspect corpusculaire se distribue sur l'écran avec la densité $|\psi|^2$, ce qui est absolument nécessaire pour interpréter les résultats expérimentaux. Comme l'a montré Einstein (communication privée) cela exige l'abandon des conceptions relativistes et paraît très difficile à développer mathématiquement.

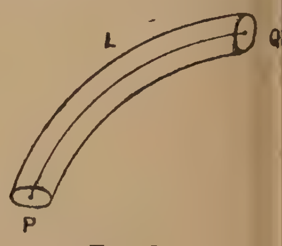


Fig. 2

Monsieur de Broglie, Bohm et moi-même, avons fait une hypothèse différente pour comprendre le mouvement individuel des micro-objets.

On admet d'abord qu'ils présentent toujours un aspect particulaire (limité à une région de l'espace peu étendue) même lorsque nous ne le voyons pas. Cela signifie qu'il existe des phénomènes intenses qui se propagent à l'intérieur d'un tube de section faible le long d'une ligne L (trajectoire) qui joint deux points P et Q, lorsqu'un micro-objet est émis en P et observé en Q.

Cette hypothèse fondamentale, qui introduit dans la théorie des éléments inobservables à l'heure actuelle, rompt évidemment avec la théorie positiviste de la connaissance, car elle suppose que l'aspect particulaire des micro-objets existe indépendamment de toute observation. Elle présente l'avantage d'expliquer les effets ponctuels des micro-objets sans recourir à des interactions incompréhensibles.

Toutefois, cet aspect ponctuel ne suffit pas. Il faut doter les particules d'un aspect étendu si on veut comprendre ce qui se passe. Revenons encore à notre expérience fondamentale (*fig.* 1). Considérons

es particules qui viennent de la gauche et passent à travers les deux entes. Si on place des compteurs derrière A et B, qui les recourent entièrement, on peut établir pour chaque particule si elle passe ar A ou par B. Bien entendu, la plupart des particules ne passeront ar aucune fente et seront absorbées par I ; mais nous ne nous intéresons qu'à celles qui ne sont pas absorbées.

Les particules ainsi observées au passage sont évidemment absorées dans les compteurs et n'atteignent pas l'écran II. Enlevons maintenant les compteurs ; conformément à l'idée que les objets existent nême lorsqu'on ne les observe pas, nous devons admettre que ces paricules, non décelées par les compteurs, sont effectivement passées par A ou B et que toute particule passée par un point P à gauche de I a uivi une trajectoire L pour parvenir à son point d'impact Q sur II. Cette hypothèse sur l'existence réelle d'une trajectoire non mesurée détermine qualitativement les caractéristiques du modèle proposé. En effet, si on suppose, comme nous venons de le faire, qu'il existe une trajectoire L, on en conclut que chaque particule est passée par une des fentes pour atteindre Q (voir *fig.* 3).

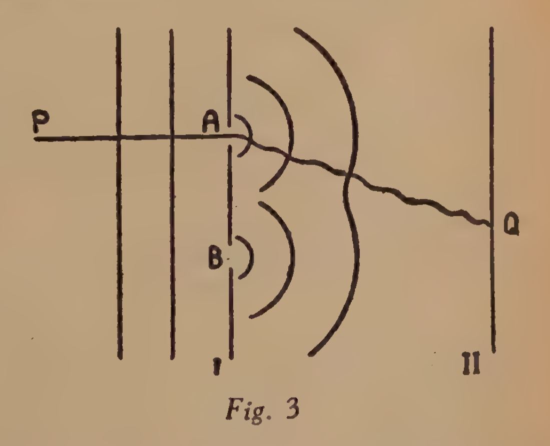


Fig. 3

Mais alors apparaît clairement la nécessité d'associer à chaque micro-objet un champ propre étendu. En effet, si on se place sur II au voisinage d'un minimum de la figure d'interférence et qu'on considère les particules passées par A, on voit qu'elles ont tendance à ne pas tomber dans cette région. Si, par contre, on ferme B, cette tendance va disparaître. Il y a donc des particules passées par A dont les trajectoires sont modifiées par l'ouverture ou la fermeture de B. Ceci rend indispensable l'idée que les mouvements des particules isolées

sont perturbés par la modification de conditions aux limites macroscopiques (telles la présence ou l'absence de B pour des particules passant par A), donc que celles-ci sont influencées par un phénomène étendu qui tient compte de ces conditions.

Il résulte de l'analyse précédente que si on admet l'existence objective des micro-objets et l'existence de mouvements L de leur aspect ponctuel, selon une trajectoire, on est nécessairement conduit à leur attribuer aussi un aspect ondulatoire étendu réel. Ces hypothèses conduisent donc presque irrésistiblement au « modèle » de l'interprétation causale qui va considérer les micro-objets comme une région singulière[5] dans un phénomène étendu.

Ce point de vue, synthèse objective des aspects ondulatoires et particulaires des micro-objets, revient donc à les considérer à la fois comme des ondes et comme des particules ; chaque micro-objet étant simultanément onde et particule. Pour développer une telle interprétation, il faut, comme nous l'avons vu, résoudre un certain nombre de problèmes que nous allons énumérer.

Il faut fournir en premier lieu un modèle déterministe des micro-objets individuels qui permette de décrire quantitativement leur comportement réel, notamment les mouvements (non classiques) de leur aspect particulaire.

Il faut ensuite montrer que la distribution des mouvements d'un ensemble donné de tels objets fournit, au moins approximativement, les distributions statistiques associées aux solutions continues connues ψ de la mécanique ondulatoire.

Il faut, enfin, traiter la question des particules en interaction, interpréter l'équation de Schrödinger dans l'espace de configuration et traiter la question des équations relativistes et des statistiques quantiques.

Avant de discuter ces problèmes, je voudrais faire quelques remarques. Notre modèle repose, comme nous l'avons vu, sur l'idée que chaque micro-objet présente à la fois un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire étendu réel. Cela rend, à mon avis, possible une tentative de synthèse entre les propriétés ondulatoires et corpusculaires du micro-objet. Contrairement à Bohr qui affirmait que ces propriétés étaient incompatibles, nous avons fourni un modèle où ils s

5. Par région singulière, nous entendons une région douée de propriétés particulières et caractéristiques qui la différencient d'une manière unique et mathématiquement bien acquise de la région étendue dont elle est partie intégrante; en première approximation on peut sans doute symboliser mathématiquement cette différenciation par une singularité

résentent comme une unité dialectique. Bien entendu, cela ne rouve pas que nous ayons raison. Mais de toutes façons, une telle synèse est bien conforme à l'esprit du matérialisme dialectique, puisu'au lieu d'affirmer que les deux aspects sont absolument contraictoires, nous les avons englobés dans une synthèse plus profonde.

Ensuite, l'idée que les micro-objets présentent en permanence un spect corpusculaire (au moins à l'intérieur d'un tube spatio-temporel) st fortement suggérée par l'expérience. Il suffit d'examiner une hambre de Wilson ou des plaques pour s'en convaincre. Je sais ien que cette synthèse est violemment combattue, même par certains iarxistes, sous prétexte qu'elle attribue à certains aspects des microhénomènes certaines propriétés (tel le tube trajectoire précédemment écrit) valables au niveau macroscopique. Il a été dit, en particulier, ue cette théorie était mécaniste et qu'il était impossible de décrire uelque aspect que ce soit des micro-objets en s'inspirant des phénoiènes macroscopiques. D'après eux, une telle tentative serait réaconnaire, parce qu'elle tend à réintroduire en microphysique des desriptions spatio-temporelles déterministes caractéristiques de la mécaique classique.

L'opinion de ces critiques ne me paraît pas correcte ; ils substiient au matérialisme dialectique une conception étroite et dogmatique. Il ne me paraît pas juste de qualifier de mécaniste une théorie, implement parce qu'elle utilise certains aspects de la mécanique clasique. Prétendre réduire l'électron à un point, ou à une boule, astreints suivre une trajectoire pseudo-classique constituerait certes un pas en rrière. Mais tel n'est point l'objectif de la nouvelle interprétation : ous considérons au contraire l'électron par exemple comme présenant une structure théoriquement analysable qui possède à la fois un spect ondulatoire étendu et un aspect corpusculaire.

Dire que cet aspect corpusculaire se meut à l'intérieur d'un tube escriptible dans l'espace-temps, comparable dans un certain sens ux trajectoires classiques, ne signifie nullement que nous prétendions amener la nouvelle mécanique microscopique aux données de la mécanique classique, mais simplement que certains aspects de la mécaique classique peuvent être utilisables dans le domaine des particules lémentaires. Il serait dogmatique à mon avis d'affirmer à priori que outes les formes des lois de la mécanique classique sont inapplicables lans le domaine microscopique. Un meilleur point de vue me semble tre de voir jusqu'à quel point peuvent être valable les lois de la onception classique.

La simple possibilité de cette première version de l'interprétation

causale montre que l'on peut aller plus loin qu'on ne l'avait cru dans cette direction et que certaines conceptions (formulation hamiltonienne des lois de la mécanique) sont encore applicables pour décrire certaines propriétés des microparticules individuelles. En ce qui nous concerne, nous pensons que les images mécaniques sont insuffisantes pour décrire les phénomènes individuels, mais qu'elles sont susceptibles d'indiquer la nature et le caractère des propriétés qualitativement nouvelles qu'il convient d'introduire pour décrire les micro-objets individuels.

L'examen des points où les formes de la mécanique classique s'avèrent insuffisantes présente un intérêt particulier, parce qu'il permet d'élaborer des conceptions nouvelles, qui offrent des possibilités pour surmonter les contradictions. On sait que les contradictions dans les théories mécaniques existantes ont souvent servi à suggérer les idées nécessaires pour les surmonter. C'est ainsi que les difficultés et contradictions de la théorie classique des électrons de Lorentz ont permis d'élaborer les concepts de base de la relativité restreinte.

Cette conception de la nature de l'aspect corpusculaire, considéré comme concentration du champ, introduit dans la mécanique quantique les conceptions de Descartes et d'Einstein, relatives à la nature profonde qu'il convient d'attribuer aux lois du mouvement. Si l'on considère en effet les particules comme des modes d'existence du champ matériel étendu, il est possible de comprendre le problème célèbre de l'interaction des champs et de la matière dans l'esprit du matérialisme dialectique, qui considère tous les aspects qualitatifs distincts comme des propriétés d'un milieu matériel unique. (Pour reprendre la phrase d'Engels, « l'unité réelle du monde consiste en sa matérialité. ») Le problème consiste à découvrir les propriétés de ce milieu et les lois qui le gouvernent dans son ensemble, de telle façon que l'évolution du champ et le mouvement du corpuscule apparaissent comme des conséquences particulières de lois plus générales de l'évolution de la matière.

De ce point de vue, les critiques contre nos conceptions portées par G.A. Svetchnikov dans son article sur la lutte contre l'indéterminisme dans la mécanique quantique (*Questions de Philosophie*, n° 6, 1954)[6], me paraissent relever d'une analyse insuffisante de la théorie et d'une incompréhension des buts que nous poursuivons.

Nous n'avons pas essayé de construire un modèle d'électron qui admette la possibilité d'une détermination simultanée de la coordon-

6. Voir la traduction de cet article dans *La Pensée*, n° 61 (*N.d.l.R.*)

née et de la vitesse. Nous avons simplement dit que l'aspect corpusculaire possède à la fois une position et une vitesse. Nous n'avons pas essayé de ramener l'unité des propriétés corpusculaires et ondulatoires à un lien mécanique extérieur entre le corpuscule et le champ d'onde environnant, puisque nous les considérons tous les deux comme des aspects d'un champ ondulatoire unique.

Nous ne nous sommes pas proposé de ramener à des formes inférieures purement mécaniques le mouvement des micro-objets individuels puisque, comme nous allons le voir, la théorie du mouvement nécessaire pour expliquer les ensembles statistiques quantiques rompt avec le déterminisme laplacien.

*

Il faut maintenant aborder le second problème fondamental de la théorie : la raison pour laquelle l'aspect particulaire des micro-objets se distribue avec la densité $|\psi|^2$ déterminée par la solution des équations linéaires de la mécanique ondulatoire.

Ceci revient à aborder la théorie des ensembles stochastiques des particules élémentaires conformes à notre modèle.

Deux tendances principales se sont progressivement dégagées sur la signification qu'il convenait d'attribuer aux ensembles stastistiques quantiques.

Selon la première tendance, qui reflète les vues de l'école de Copenhague, l'ensemble de toutes les connaissances possibles que l'on peut obtenir sur *un* micro-objet, est fourni par une « fonction d'état » ψ de nature statistique. Le caractère statistique, observé expérimentalement, des phénomènes quantiques résulte des interactions imprévisibles entre les micro-objets et les appareils macroscopiques. C'est pourquoi les partisans de l'école de Copenhague défendent l'idée positiviste qu'il est impossible de connaître et de décrire la structure et le comportement de microphénomènes indépendamment de l'observateur.

La seconde tendance, exprimée sous diverses formes, a été introduite dès l'origine de la mécanique quantique, par de Broglie et Langevin. Abandonnée pendant une vingtaine d'années, elle a été reprise et développée systématiquement en 1947-1948 devant l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. par Blokhinzev et Terletski, puis récemment par Bohm, de Broglie et l'auteur.

Terletski, par exemple, résume ainsi ce point de vue :

1° — les micro-objets existent indépendamment de tout observateur ;

2° — il est possible de s'en forger une représentation déterministe qui rende compte à la fois du comportement individuel réel de ces micro-objets et des propriétés objectives des ensembles statistiques de tels objets. Ce « modèle » devra tenir compte des aspects corpusculaires et ondulatoires présentés par les microprocessus ;

3° — la mécanique quantique n'est pas une théorie du micro-objet individuel, comme on le considérait selon le principe de complémentarité. La mécanique quantique est une théorie statistique, c'est-à-dire une théorie applicable aux ensembles statistiques de micro-objets. La mécanique quantique ne peut représenter complètement le mouvement des micro-objets individuels (électrons, photons, etc.) mais représente seulement le comportement d'un ensemble de micro-objets identiques apparaissant soit simultanément soit dans une série d'expériences consécutives. Cela est dû au fait que l'appareil existant de la mécanique quantique ne permet de calculer que les valeurs possibles des différentes grandeurs physiques (problème des valeurs propres) et les probabilités de transition d'un état à un autre. La connaissance de la probabilité d'un état donné d'un micro-objet ne donne pas encore de renseignements complets sur son état véritable et, par conséquent, la description donnée par la mécanique quantique à l'aide d'une fonction d'onde ne représente pas entièrement l'état de l'objet.

On peut illustrer expérimentalement ce point de vue. Développant des expériences de Taylor, Dempster et Batho, les expériences célèbres de Vavilov sur la microstructure de la lumière montrent en effet que les figures d'interférence obtenues à l'aide de flux lumineux de faible intensité présentent des fluctuations correspondant à l'arrivée des photons individuels qui les constituent. On observe alors que si les franges sombres se maintiennent sans changement, les franges claires présentent des fluctuations désordonnées indépendantes. Cela peut s'interpréter en disant que les photons sont soumis, dans leur chaos statistique apparent, aux lois ondulatoires habituelles.

En somme, dans le cadre de ce second point de vue, le problème essentiel posé aux physiciens se résume ainsi : rechercher un « modèle » et une micromécanique déterministe des micro-objets individuels qui admette comme mécanique statistique objective la mécanique quantique habituelle.

C'est dans cet esprit, par exemple, que M. de Broglie, développant dès 1927 sa théorie de la double solution, distinguait : une onde réelle « *u* » à singularité représentant à la fois une particule et son

champ, et une onde ψ de même phase, chargée de décrire l'évolution statistique d'un ensemble de particules du type précédent.

Il est clair que seul le second point de vue est compatible avec les conceptions matérialistes. Nous l'adopterons donc et allons maintenant chercher à établir que les lois statistiques associées à la définition des particules élémentaires fournies précédemment redonnent la mécanique quantique habituelle (interprétée dans le cadre du point de vue précédent).

Les lois statistiques décrivent évidemment le comportement réel des ensembles d'objets considérés et n'ont rien à voir avec les connaissances (plus ou moins étendues) d'un observateur éventuel sur l'ensemble des objets. Pour nous, le calcul des probabilités, en effet, a pour but de décrire correctement la façon dont certains événements se produisent réellement dans un ensemble très grand d'événements soumis à des lois causales sous-jacentes très complexes.

Les conceptions bien connues d'Engels sur la contingence et la nécessité, développées dans la *Dialectique de la Nature*, nous ont conduits, M. Bohm et moi-même, à développer ce que j'appellerai la théorie des niveaux, qui me semble bien conforme aux conceptions fondamentales du matérialisme dialectique. Selon cette conception, les phénomènes matériels existent objectivement et sont qualitativement inépuisables. Au fur et à mesure que l'on analyse leurs propriétés et leur comportement, on découvrira sans cesse des propriétés nouvelles plus complexes, qui relèvent de formes d'existence qualitativement distinctes de la matière.

Ce point de vue permet en effet de conserver les deux classes de lois précédentes (causales et statistiques) comme décrivant toutes les deux le comportement réel des choses sans qu'il soit jamais possible d'expliquer l'ensemble de ce comportement à l'aide de l'une d'entre elles. Par exemple nous ne pensons pas qu'il soit jamais possible d'élaborer un modèle de particule et un système de lois causales unique qui permette, étant données les conditions initiales suffisamment étendues, de calculer une fois pour toutes l'évolution de la nature, car l'existence d'un tel système est contraire au caractère inépuisable des choses. De la même façon, il ne peut exister de limites à l'analyse scientifique des phénomènes, une loi statistique relevant nécessairement d'un comportement causal objectif à un niveau plus profond. Il n'y a pas de limites à la connaissance scientifique, qui progressera indéfiniment dans l'analyse du comportement objectif des phénomènes, sans jamais pouvoir en épuiser la richesse, les lois causales et statistiques étant inextricablement liées à chaque niveau.

De plus, nous ne pensons pas que les lois causales que nous proposons pour décrire le comportement individuel des micro-objets, puissent constituer autre chose qu'une approximation de l'état de la matière. Il subsistera toujours, en dehors de la théorie, des phénomènes très compliqués, extérieurs et sous-jacents qui, quoique déterminés individuellement, agiront en fait comme s'ils étaient gouvernés par le hasard.

Pour nous, un ensemble de lois décrit un niveau déterminé du mouvement, comme par exemple la mécanique classique ou les lois des gaz ; il n'est valable que pour ce niveau et doit être remplacé par des lois nouvelles lorsqu'on aborde un niveau différent. L'expérience a ainsi montré qu'on ne pouvait étendre le « modèle » classique aux micro-objets individuels qui constituent la matière classique et qu'il fallait introduire la théorie cinétique si on voulait tirer au clair la structure moléculaire des gaz.

Il n'est pas exact de dire que les lois anciennes constituent une approximation des lois nouvelles (qui ne feraient « qu'ajouter des décimales » pour reprendre une expression de Kirchhoff). Il peut fort bien se faire qu'elles traduisent des effets stochastiques fort compliqués dus à des lois sous-jacentes tout à fait différentes. C'est le cas, par exemple, de la mécanique classique qui, conformément au théorème d'Ehrenfest, décrit une sorte de mouvement moyen de micro-objets dotés de propriétés ondulatoires absolument étrangères au modèle classique.

Au reste, comme l'a remarqué David Bohm, cette notion de niveau n'est pas nécessairement liée à celle de dimensions (par exemple le « niveau quantique » correspondrait à des dimensions allant de 10^{-5} jusqu'à 10^{-13} cm., au delà desquelles commencerait un niveau plus profond, etc.) ; elle peut être associée aussi à des conditions physiques particulières, telles que fortes densités, très hautes énergies ou extraordinaire complexité d'organisation.

Dans cette conception, chaque niveau est gouverné par des lois causales et subit sous forme de lois stochastiques l'action chaotique de l'ensemble infini des niveaux qui constituent la nature. Tout phénomène physique apparaît ainsi comme tissé inextricablement de causalité et de hasard, à la fois synthèse et résultante mobile des mouvements infiniment complexes de la matière dont il surgit.

Cette conception objective de la notion de hasard, à laquelle M. L. de Broglie vient de se rallier, va nous permettre de comprendre la distribution statistique de l'aspect corpusculaire des micro-objets

et de démontrer qu'elle tend vers la distribution $|\psi|^2$ prévue par la théorie habituelle. Considérons un objet représenté par une onde singulière réelle *u* qui se confond à l'extérieur de l'aspect particulaire avec une solution régulière ψ de l'équation d'onde. L'analyse faite précédemment nous montre que tout se passe comme si l'aspect particulaire était soumis à des forces d'un genre nouveau, déterminées par ψ. Mais il est bien évident qu'il n'y a là qu'une abstraction puisque les conditions aux limites constituent nécessairement une approximation des conditions physiques réelles et que, de façon plus générale, le modèle proposé (et en particulier l'onde *u* avec sa loi de propagation) ne peut prétendre épuiser la nature du phénomène. Cette loi n'est absolument rigoureuse qu'à une certaine échelle et à un certain degré de précision et l'on peut prévoir à priori que la découverte de caractères encore inconnus de la matière, situés à un niveau plus profond, viendra apporter aux résultats de légères perturbations, suffisantes pour qu'on n'ait pas le droit de traiter la loi comme totalement rigoureuse.

Or, ces considérations nous interdisent de parler de conditions rigoureusement identiques pour des particules différentes. Les conceptions théoriques auxquelles nous sommes parvenus ne peuvent — comme toute expression d'une loi physique — représenter qu'une sorte d'état moyen du système réel. Il en résulte que la particule ne peut suivre rigoureusement les trajectoires introduites dans la théorie et subit nécessairement les fluctuations désordonnées qui l'écartent du mouvement initialement prévu. Il est possible de montrer, en faisant des hypothèses raisonnables sur les fluctuations, que la répartition tendra vers la répartition $|\psi|^2$ observée expérimentalement.

Ce théorème, démontré par M. Bohm et moi-même [7], joue un rôle fondamental dans la théorie, puisqu'il permet d'établir que les *distributions* quantiques correspondent aux *répartitions* d'équilibre d'un ensemble de micro-objets, placés dans des conditions physiques réelles. Ceci constitue une illustration concrète du modèle particulier de micro-objet que nous avons proposé, en partant du point de vue statistique développé par Blokhinzev et Terletski.

La nouvelle interprétation s'oppose absolument à l'interprétation habituelle par la signification qu'elle attribue à la notion de probabilité.

Pour l'école de Copenhague, la probabilité est un élément irré-

7. *Physical Review*, oct. 1954. Thèse (Paris 1954).

ductible de la théorie qui limite définitivement notre connaissance de la nature. Pour MM. Bohr, Pauli et Heisenberg, il est par exemple absolument impossible de résoudre au niveau quantique le problème du mouvement des micro-objets individuels, ce qui ruine pour toujours le déterminisme. La distribution $P = |\psi|^2$ sera par nature à jamais inexplicable, inanalysable et inaltérable, quelles que soient les conditions physiques agissant sur les particules.

Dans l'interprétation causale, au contraire, il n'est pas nécessaire d'introduire une telle limitation de nos connaissances. Comme nous venons de le voir, il est possible de fournir un « modèle » déterministe des micro-objets individuels qui permette d'expliquer la distribution $P = |\psi|^2$ d'un ensemble de tels objets dans un état donné lorsqu'on tient compte de l'action des phénomènes extérieurs au système de particules considéré.

Toutefois, et je tiens à le répéter, la nouvelle interprétation ne constitue pas un retour au déterminisme mécaniste de Laplace. Nous ne pensons pas qu'un modèle de particule et un système de lois uniques permettent, étant donné des conditions suffisamment étendues, de calculer une fois pour toutes l'évolution de la nature.

Au contraire, et c'est là à notre avis ce qui constitue en partie l'intérêt des théorèmes stochastiques que nous avons établis, nous avons introduit et utilisé systématiquement la notion dialectique du caractère à la fois absolu (car conforme à la réalité objective des choses) et relatif (car aucun modèle ne peut prétendre à en épuiser la richesse) de toute théorie relative à la nature des micro-objets.

Il y a plus : attribuer l'établissement des densités limites quantiques à des fluctuations sous-jacentes revient à effectuer, par rapport à la théorie des quanta, une tentative analogue à celle qu'ont effectuée Perrin, Einstein et Smoluchovski lorsqu'ils ont attribué le mouvement brownien à l'agitation chaotique de molécules que nul n'avait observées jusqu'alors, au lieu de supposer que ce mouvement était par nature inexplicable. Ils ont ainsi ouvert la voie, non seulement à l'observation de ces particules hypothétiques, mais encore à l'investigation théorique de nombreux phénomènes. Nous espérons de même que les hypothèses qui ont été exposées, hypothèses qui reviennent à attribuer la densité $P = |\psi|^2$ à l'action de phénomènes sous-jacents, ouvriront la voie à l'étude de ces phénomènes eux-mêmes puisque la nouvelle interprétation soulève des problèmes nouveaux, inconcevables dans le cadre de l'ancienne théorie. Dans quelles conditions, par exemple, peut-on avoir P différent de $|\psi|^2$? Quel est le temps nécessaire pour qu'un ensemble de micro-objets dans un état

onné atteigne la densité limite $P = |\psi|^2$? Autant de questions ii sont susceptibles, nous l'espérons, de conduire à des expériences un type nouveau.

De ce point de vue, il ne me paraît pas juste de dire, comme le it G.A. Svetchnikov, que « la causalité dans les processus quanti-ues est comprise [par Vigier] de la même façon que dans la méca-ique analytique, c'est-à-dire comme la possibilité de déterminer le ouvement de la microparticule d'après certaines conditions initiales »[8] que nous considérons l'électron « comme une formation mécanique et on physique », puisque précisément le modèle des micro-objets que ous proposons est qualitativement différent des conceptions classi-ues (puisqu'il est constitué par un phénomène ondulatoire réel, unis-ant l'aspect corpusculaire réel et l'aspect étendu) et que le théorème tatistique fondamental élaboré avec Bohm tient compte quantitative-nent du caractère inépuisable de la matière et de l'interaction uni-erselle des choses.

*

Il nous faut ensuite traiter une troisième question, qui a joué un rôle essentiel dans la discussion des fondements de la mécanique quan-tique : la théorie de la mesure.

La théorie de la mesure constitue, à mon avis, une des contribu-tions les plus originales de la nouvelle interprétation, car elle permet pour la première fois d'effectuer une analyse du processus d'interac-tion entre les appareils macroscopiques utilisés habituellement et les micro-objets observés, appareils et micro-objets étant considérés évi-demment comme existant objectivement. Le modèle proposé de micro-objet permet de démontrer que les appareils jouent objectivement, par rapport aux phénomènes ondulatoires réels, le rôle d'analyseurs spec-traux au sens de Blokhinzev. La nouvelle théorie de la mesure consti-tue donc, à mon avis, une illustration concrète du programme proposé par les physiciens soviétiques.

Contrairement à l'école de Copenhague, qui nie en principe la possibilité d'établir les résultats objectifs des mesures portant sur les micro-objets et considère que le but de la théorie est uniquement de fournir un symbolisme mathématique pour la « mise en ordre » des

8. *La Pensée*, nº 61, 1955, p. 53.

résultats des mesures effectuées par un observateur, l'interprétation causale que nous proposons prend une position diamétralement opposée. Selon elle, en effet, les micro-objets et les appareils, composés eux-mêmes de micro-objets, existent indépendamment de nous dans la nature. Ils peuvent être décrits, du moins aux niveaux considérés, par des ondes *u* qui en fournissent une représentation approchée. Ces ondes permettent aussi, par l'intermédiaire de leurs parties régulières, de calculer la densité statistique d'ensembles de particules dans un état donné ayant atteint leur état d'équilibre. Les « paramètres cachés » caractérisent à la fois les descriptions du micro-objet *et* de l'appareil de mesure.

Avant l'interaction, le micro-objet et l'appareil évoluent indépendamment et leurs fonctions d'état sont gouvernées par des hamiltoniens distincts.

Pendant la mesure, il y a interaction entre l'appareil et le micro-objet, représentée par l'introduction d'un hamiltonien d'interaction H_1. L'appareil et le micro-objet s'influencent mutuellement et les états originels du micro-objet et de l'appareil sont évidemment perturbés. Cette interaction est caractéristique du processus de mesure car les variations observées dans l'appareil peuvent être reliées causalement aux états réels du micro-objet et de l'appareil avant la mesure.

Après la mesure, si l'interaction cesse, l'appareil et le micro-objet vont évoluer indépendamment, dans des états qui diffèrent en général des états où ils se trouvaient auparavant. On peut les prévoir en principe lorsqu'on se donne les états initiaux du micro-objet et du dispositif d'observation.

Sur la base de ces conceptions, il est possible d'édifier une théorie causale de la mesure[9] qui montre que les appareils macroscopiques utilisés jusqu'ici se comportent effectivement comme des analyseurs spectraux et décomposent l'onde réelle incidente en paquets d'ondes qui correspondent aux fonctions propres ψ_i d'un opérateur A associé à l'appareil. L'aspect corpusculaire entre alors dans un de ces paquets ψ_i et l'appareil donne alors la valeur λ_i. On démontre alors qu'un ensemble de mesures se répartit nécessairement sur les λ_i avec la probabilité $|C_i|^2$ postulée par M. Bohr. Ceci montre qu'au niveau considéré les deux interprétations recouvrent à l'heure actuelle les mêmes résultats expérimentaux. Les indéterminations d'Heisenberg perdent dans cette conception leur caractère idéaliste de barrière imposée à la connaissance pour ne conserver qu'un signification statistique : l

9. D. Bohm, *Physical Review*, janvier 1952.

oduit des écarts types Δp et Δq d'une collection de mesures effec-
ées sur deux grandeurs canoniquement conjuguées p et q satisfait
cessairement à la relation $\Delta p \,.\, \Delta q \geqslant h$.

Les incertitudes d'Heisenberg expriment donc tout simplement e propriété statistique des mesures que l'on effectue à l'heure ac-elle. Comme nous ne savons pas déterminer dans de telles mesures propriétés vraies (positions et moments des particules, etc.) des cro-objets individuels, on est contraint, du point de vue statistique, se limiter et de considérer ces propriétés, qui caractérisent à la is l'objet et l'appareil, comme des paramètres *provisoirement* cachés. es grandeurs accessibles à l'observation auxquelles nous avons affaire ont de sens par rapport aux objets observés qu'au niveau classique l'on peut négliger les effets de l'appareil. Au niveau quantique, es grandeurs ne peuvent caractériser les micro-objets en dehors de appareil, puisque les résultats obtenus résultent d'une interaction u'il est impossible de négliger en général.

*

Après avoir traité des trois problèmes essentiels relatifs aux micro-bjets individuels (dualité onde-corpuscule, distribution statistique et néorie de la mesure), indiquons brièvement les problèmes actuellement raités et ceux qu'il convient de résoudre dans le cadre de la méca-ique submicroscopique.

Tout d'abord, il est nécessaire de comprendre, dans le cadre de 'espace-temps réel, le comportement d'un système de micro-objets en nteraction dont la distribution statistique est correctement décrite par une onde de Schrödinger dans l'espace de configuration. Il est clair en effet, que cette description est absolument incompatible avec une loi causale quelconque et la conception matérialiste de l'évolution de la matière dans le cadre de l'espace et du temps. Naturellement, je ne puis développer ici le détail mathématique de la théorie propo-sée par M. de Broglie et moi-même. Elle repose sur l'idée que les N micro-objets sont assimilables à N ondes corrélées réelles se pro-pageant dans l'espace-temps et s'influençant réciproquement. Il est pos-sible de montrer qu'un tel modèle fournit effectivement une distri-bution statistique des aspects corpusculaires correspondant à des solu-tions de l'équation de Schrödinger dans l'espace de configuration. Bien entendu ce n'est là qu'un premier pas et nous nous efforçons de

comprendre, en introduisant dans notre modèle la notion de spin, la signification physique qu'il convient d'attribuer aux statistiques de Bose-Einstein et de Fermi-Dirac.

Une autre direction de recherches a consisté à mettre en évidence la signification concrète de la notion de spin. Revenons pour cela au modèle hydrodynamique du corpuscule individuel[10]. Si l'on assimile chaque corpuscule individuel à une espèce de singularité localisée dans un fluide qui s'écoule, il est possible de comprendre la notion de spin en disant que chaque élément de cet écoulement est doté de mouvements tourbillonnaires. Ceci revient à ajouter un troisième paramètre caché (la rotation propre) aux deux paramètres (position et vitesse) précédemment introduits.

Si l'on suppose alors que la partie singulière de l'écoulement qui correspond à l'aspect particulaire du micro-objet tourne sur elle-même de façon synchrone avec la rotation de la partie étendue de l'onde avec laquelle elle est liée, il est possible d'élaborer une théorie du spin des micro-objets individuels qui fournit les résultats statistiques obtenus dans l'interprétation probabiliste. Proposé par Bohm et moi-même, ce modèle a en effet été étendu par Bohm, Tiomo et Schiller[11] au cas de l'équation de Pauli, par Takabayasi à celui de l'équation de Dirac et enfin par Halbwachs, Lochak et moi-même[12] au cas général des particules à spin relativistes.

Dans une autre direction de recherches, il convient de se poser le problème de la structure de l'aspect corpusculaire introduit par la nouvelle interprétation. C'est là un problème mathématique très difficile, qui a provoqué l'abandon de sa théorie initiale par M. de Broglie. Il s'agit d'étudier des solutions singulières localisées d'équations non linéaires qui se propagent dans la partie régulière de l'onde conformément aux lois de mouvement de la nouvelle interprétation.

En l'absence de théorie mathématique générale de telles équations, on ne peut procéder que progressivement, puisqu'il est nécessaire d'élaborer au fur et à mesure la théorie mathématique correspondante. Ces derniers temps, toutefois, des résultats intéressants dans cette voie ont été obtenus à l'Institut Henri Poincaré. M. Fer[13], reprenant en particulier les idées anciennes de M. de Broglie, a réussi à établir l'existence et la structure asymptotique de telles solutions, ce qui va nous permettre, nous l'espérons, d'aborder le problème des interactions

10. Cf. Bohm et Vigier : *Physical Review*, octobre 1954.
11. *Nuovo Cimento*, supplément, fasc. 1, 1955.
12. *Comptes rendus Ac. Sc.*, oct. 1955.
13. Thèse présentée en décembre 1955.

re les aspects corpusculaires séparés par des distances de l'ordre de $^{-13}$ cm.

Reste enfin, pour dégager plus complètement le sens des résultats nnus, à traiter le problème de la seconde quantification dans la nouvle interprétation. Disons tout de suite que nous n'avons pas encore ssi à le traiter de façon suffisante, car il se présente pour nous dans s termes très différents de ceux des théories habituelles.

Dans l'interprétation probabiliste, il ne s'agit de rendre compte que s résultats statistiques du phénomène de transformation des particules ėmentaires les unes dans les autres. Selon cette interprétation, toute scription individuelle de ces transformations est par définition inaccesle à l'entendement humain et ne relève pas d'une description causale entuelle.

Pour nous, au contraire, il s'agit de fournir une description causale ces transformations individuelles qui redonne les résultats habituels squ'on l'applique à un collectif statistique. Une telle explication ne ut évidemment se concevoir sans franchir une nouvelle étape qualitive, et je vais me contenter d'indiquer à ce propos l'orientation actelle des recherches entreprises. Revenons au modèle proposé du mio-objet individuel. Pour expliquer les transformations individuelles es corpuscules les uns dans les autres, l'idée vient immédiatement, si otre conception est correcte, de les considérer comme des modes de bration différents d'une susbtance fondamentale unique, modes qui se ansformeraient les uns dans les autres dans des conditions physiques éterminées.

Ceci nous amène à une révision plus radicale encore des conceptions abituelles. Comme on sait, l'atomisme mécaniste classique consistait à e représenter les atomes comme de petits corpuscules en mouvements haotiques dans le vide. L'idée que les micro-objets sont effectivement onstitués par un phénomène ondulatoire qui peut se transformer qualiativement suggère l'abandon de cette conception dualiste et conduit à upprimer la notion de vide pour la remplacer par une substance subnicroscopique chaotique étendue.

Au niveau submicroscopique, l'ensemble de la nature serait assinilable à une sorte de substance matérielle unique, douée de mouvenents tourbillonnaires et chaotiques violents. Les corpuscules ne eraient alors rien d'autre que des ondes de faible amplitude se propageant dans ce milieu, comparables en un certain sens aux ondes sonores se propageant dans les liquides. Si cette hypothèse est correcte, on comprendrait alors la transformation des corpuscules les

uns dans les autres, qui correspondrait tout simplement à des variations brusques de l'état ondulatoire de cette substance.

Bien entendu je ne prétends pas que nous ayons absolument raison et que les choses se passent effectivement ainsi. Toutefois, dans un travail qui sera publié prochainement dans la *Physical Review*, nous avons réussi à montrer, Bohm, Lochak et moi-même, qu'il est possible d'élaborer une théorie quantitative d'un tel écoulement, à la fois chaotique et tourbillonnaire, compatible avec les principes relativistes selon lesquels les ondes se propagent en satisfaisant à l'équation de Dirac. Le potentiel quantique introduit par de Broglie acquiert ainsi un sens nouveau. Il représente l'effet des fluctuations chaotiques de la substance fondamentale submicroscopique sur les ondes qui s'y propagent. Nous espérons à partir de là, en enrichissant l'image initiale, développer une théorie causale de l'interaction des micro-objets.

Ce qui vient d'être dit suffit, je l'espère, à établir que, bien loin de vouloir revenir aux conceptions classiques, la nouvelle mécanique submicroscopique entend simplement se servir de certaines formes et de certains modèles précis pour progresser d'étape en étape vers la connaissance de phénomènes sous-jacents à la théorie des quanta.

Bien entendu, il est trop tôt pour affirmer que cette conception, qui rappelle par certains côtés des idées très anciennes de Descartes, Riemann, Kelvin et Einstein, correspond effectivement au comportement de la matière à des niveaux aussi profonds (que nous sommes encore incapables d'aborder du point de vue expérimental).

Mais elle présente à nos yeux l'intérêt de fournir un point de départ matérialiste possible. Au cours du XIXe siècle, l'image des atomes que se formaient les physiciens matérialistes adversaires de l'école empiriocriticiste de Vienne était évidemment grossièrement approchée (elle a été précisée par les découvertes expérimentales de Perrin et de ses successeurs), mais elle avait eu l'immense mérite d'orienter la recherche vers l'exploration de régions nouvelles, dont l'école idéaliste contestait l'existence. D'une manière analogue, nous espérons que notre tentative orientera les physiciens vers l'exploration du comportement des microphénomènes individuels des propriétés submicroscopiques de la matière.

*

Je voudrais conclure sur quelques remarques générales.

J'ai voulu souligner, en premier lieu, dans cet article que la ba-ille entre l'idéalisme et le matérialisme en physique ne se livre pas ulement sur le plan de la discussion philosophique, mais aussi et rtout sur le plan scientifique. En raison du développement même de interprétation de l'école de Copenhague, les physiciens matérialistes trouvent aujourd'hui, peut-être pour la première fois dans l'histoire es sciences depuis la Renaissance, face à une école idéaliste domi-ante. Ils ne feront progresser la science et ne retourneront l'opinion es physiciens en leur faveur que s'ils sont capables, non seulement e démasquer les fondements idéalistes abusivement introduits à la ase de l'interprétation probabiliste, mais surtout d'édifier une théorie atérialiste de la nature et du comportement des micro-objets indivi-uels. Il me semble, de ce point de vue, que l'on a eu en U.R.S.S. une npression trop optimiste sur l'orientation générale des physiciens ans le monde capitaliste. Il est exact que les interventions des phy-iciens soviétiques et le développement même de l'interprétation cau-ale ont créé un mouvement parmi les physiciens occidentaux en fa-eur du matérialisme — mouvement qui s'élargit progressivement puis-u'un certain nombre de physiciens américains, anglais, japonais, sud-méricains et allemands s'orientent vers une révision des principes de 'école de Copenhague. Mais l'immense majorité des physiciens sont ncore, soit sur des positions idéalistes, soit sur des positions réformis-es. Ils estiment, par exemple, que les principes empiriocriticistes domi-ants sont parfaitement compatibles avec le matérialisme et constituent out au plus une légère écume philosophique dont il suffit de débar-asser la théorie pour la rendre compatible avec les principes du maté-ialisme dialectique.

Il me semble absolument indispensable que l'ensemble des ad-versaires de l'orientation actuelle s'engage dans des recherches concrètes pour édifier une théorie nouvelle dans l'esprit du matéria-lisme dialectique et fournisse le travail scientifique correspondant. Il est nécessaire que toute idée ou théorie avancée dans la direction matérialiste soit discutée non seulement sur la base des principes du matérialisme dialectique mais aussi et surtout sur le plan technique.

Il faut que la discussion et la critique soient développées au maxi-mum, de façon à faire progresser les théories matérialistes le plus

rapidement et dans les meilleures conditions possibles. Sans critiques, sans discussion et sans union entre tous les adversaires de l'école de Copenhague, il ne sera pas possible de développer la bataille contre l'idéalisme dans la science.

J'espère enfin avoir démontré dans cet article que la théorie que nous développons est bien conforme aux principes du matérialisme dialectique. De ce point de vue, il est erroné, à mon avis, de l'opposer, comme semble le faire G.A. Svetchnikov, au programme proposé en 1947 par Blokhinzev et un certain nombre de physiciens soviétiques. En fait, je considère que le modèle proposé des micro-objets individuels et la micromécanique correspondante que nous essayons de développer constituent une théorie concrète illustrant les principaux points de ce programme. Nous ne pouvons, bien entendu, à l'heure actuelle, affirmer qu'elle est seule valable, en l'absence de réalisations expérimentales. Il pourra être certes nécessaire de la modifier et de refondre certains points. Mais je ne puis m'empêcher de penser qu'elle est fondamentalement correcte, car le modèle proposé se développe constamment dans le sens même de ce programme, en dépit du petit nombre de physiciens qui y travaillent actuellement.

Jean-Pierre VIGIER.

Вопросы Философии (*Questions de philosophie*), 1956, 6, pp. 91-106.

L'INTERACTION DES PARTICULES ELEMENTAIRES

Une des tâches fondamentales de la physique est le développe-
ıent et l'approfondissement de notre connaissance des lois de la ature. Nos idées sur les phénomènes physiques subissent avec le emps une évolution complexe. Les énoncés de Newton, qui paraisaient intangibles, ont subi au début du XXe siècle des changements apitaux dans deux directions. D'une part, il est apparu que les iouvements à grande vitesse sont soumis aux lois de la théorie de a relativité d'Einstein, lois qui conduisent à des conclusions s'écarant de façon essentielle de la mécanique newtonienne. D'autre part, a mécanique de Newton est également apparue comme non valable à 'échelle atomique. Les travaux de Bohr, Heisenberg, Schrödinger et Dirac ont créé la mécanique quantique, qui est parvenue à expliquer es phénomènes physiques qui se produisent dans les atomes.

Les nouvelles lois établies par la théorie de la relativité et la mécanique quantique n'abolissent pas les lois de Newton. Pour les objets dont les dimensions ne sont pas très petites et qui se meuvent à des vitesses très inférieures à la vitesse de la lumière, les lois de la théorie le la relativité et de la mécanique quantique redonnent les lois de Newton. Ainsi, une théorie physique nouvelle peut être considérée comme le développement, dans une direction déterminée, de nos idées antérieures. La mécanique quantique, combinée à la théorie de la elativité, a entièrement expliqué le mouvement des électrons dans les atomes et le mouvement du noyau comme un tout.

L'objet fondamental d'étude de la physique actuelle, ce sont les particules élémentaires dont est constituée la matière qui nous entoure. Une de ces particules est l'électron. Les noyaux des atomes sont formés de particules élémentaires d'un autre type : protons et neutrons. En outre, il existe les photons (quanta de lumière), les mésons (par-

ticules de masse intermédiaire entre la masse de l'électron et celle du proton) et les hypérons (particules de masse légèrement supérieure à celle du proton). La majorité des particules qui viennent d'être énumérées possèdent leurs antiparticules (par exemple positons, antiprotons, antineutrons), dont l'existence avait été prévue par Dirac entre 1930 et 1940. Les propriétés des antiparticules sont, en un certain sens, l'opposé des propriétés des particules fondamentales. Lors du choc d'une particule avec l'antiparticule correspondante, il peut se produire l'annihilation des particules, c'est-à-dire leur transformation en d'autres particules (transformation d'un électron et d'un positon en deux ou trois photons, d'un antiproton et d'un proton principalement en mésons, etc.).

Dans la théorie actuelle, toutes les particules élémentaires ne peuvent par principe être considérées que comme des points matériels. Après 1930, il est apparu que la théorie de l'interaction des électrons, des positons et des photons fondée sur la conception des particules ponctuelles conduit à des valeurs infinies pour des grandeurs qui ont expérimentalement des valeurs entièrement déterminées. Mais dans les années qui ont précédé 1950, les travaux de Schwinger, Feynman et Dyson mirent au point des méthodes permettant d'éliminer les infinis, de rendre compte des effets les plus fins dans le mouvement des électrons dans les atomes, et d'en obtenir les caractéristiques avec une énorme précision (jusqu'au 7e chiffre significatif).

Mais les nombreuses tentatives faites pour appliquer la théorie actuelle à la description de l'interaction des particules dans les noyaux atomiques sont restées sans aucun résultat. Sur cette voie, on n'a réussi à obtenir aucun accord avec les données expérimentales. On a généralement considéré que cela était lié au fait que les calculs pratiques de la théorie actuelle reposent sur l'hypothèse de la faiblesse des interactions. Cette hypothèse est effectivement vérifiée en ce qui concerne les interactions électromagnétiques, qui jouent le rôle essentiel dans l'atome. Cependant, l'expérience montre que les interactions dans le noyau sont fortes. C'est pourquoi on considérait que la difficulté fondamentale de la théorie actuelle serait surmontée si on réussissait à mettre au point des méthodes de calcul des interactions fortes. C'est dans cette direction qu'allaient les travaux de la majorité des physiciens théoriciens.

Dans les travaux de L.D. Landau, I.J. Pomerantchouk et des auteurs de cet article ont été trouvées pour la première fois des méthodes d'analyse pour des interactions d'une intensité quelconque. On

alors obtenu un résultat tout à fait inattendu. Il est apparu que l'interaction est d'autant plus faible que les dimensions du domaine auquel elle s'étend sont plus petites. Une interaction qui se produit dans un très petit domaine ne peut être forte ; de plus, pour le cas limite, c'est-à-dire pour une interaction ponctuelle, une théorie conséquente conduit au résultat de l'absence de toute interaction. L'analyse mathématique a montré que l'apparition d'infinis dans la théorie était liée au développement de certaines formules en séries. En réalité, les formules exactes contiennent les infinis non au numérateur, mais au dénominateur, et il en résulte que les grandeurs qui auparavant semblaient infinies deviennent nulles.

Une question peut se poser : pourquoi donc la théorie explique-t-elle si bien le mouvement des électrons dans les atomes ? C'est une conséquence de l'extrême faiblesse des interactions électromagnétiques. C'est pourquoi les dimensions du domaine auquel doit s'étendre l'interaction électromagnétique doivent être incroyablement petites, très inférieures non seulement aux dimensions des atomes, mais aux dimensions des noyaux (le « rayon » de l'électron doit n'être que de l'ordre de 10^{-100} cm., alors que les dimensions des noyaux sont de l'ordre de 10^{-12} cm.). Des dimensions si petites ne peuvent naturellement influencer en aucune manière les phénomènes physiques qui se déroulent dans les atomes et les noyaux, en sorte que les électrons et les positons peuvent être considérés pratiquement comme des particules ponctuelles.

La situation devient entièrement différente quand nous passons aux forces nucléaires, c'est-à-dire aux forces qui agissent entre les particules qui se trouvent à l'intérieur du noyau (protons et neutrons). Comme nous l'avons déjà noté, ces interactions sont fortes. C'est pourquoi les protons et les neutrons ne peuvent nullement être considérés comme ponctuels. Au contraire, on est amené à considérer que les protons et les neutrons ont des dimensions comparables aux distances qui les séparent dans le noyau.

Ces conclusions ont reçu récemment une intéressante confirmation dans les expériences sur l'annihilation des antiprotons avec les protons. Il est apparu que ce processus se produit avec une efficacité plusieurs dizaines de fois supérieure à ce qu'elle pourrait être dans le cas où serait juste la conception de l'interaction ponctuelle.

Une situation nouvelle et très difficile est apparue dans la théorie. A l'heure actuelle, la physique n'est pas adaptée à l'étude des particules étendues (interactions non ponctuelles). D'après les idées actuelles de telles particules ne peuvent être élémentaires, elles doi-

vent être constituées d'autres particules. Mais, dans ce cas, la difficulté est reportée sur ces particules constitutives. Il est naturel qu'une telle tentative pour résoudre les difficultés qui sont apparues soit stérile. Lorsqu'on passe aux dimensions nucléaires, les énoncés fondamentaux de la théorie actuelle ne sont pas applicables et doivent être reconsidérés de façon radicale. Pour le moment, il est encore difficile de deviner ce que sera la nouvelle théorie, mais il est déjà clair que seule la création d'une telle théorie peut aboutir à un progrès essentiel de la physique actuelle.

A.A. ABRIKOSSOV
I.M. KHALATNIKOV

Взаимодействие элементарных частиц. Наука и Жизнь (*La Science et la Vie*), 1957, 4, pp. 9-10.

Traduit par François LURÇAT.

LOIS DYNAMIQUES ET STATISTIQUES DANS LES PHENOMENES ATOMIQUES

I

La connaissance des lois auxquelles obéissent les particules atomiques nous découvre le tableau complexe et contradictoire des phénomènes microscopiques. La théorie atomique actuelle — la mécanique quantique — représente un premier pas, mais un pas important, dans la connaissance des propriétés du mouvement des particules microscopiques. Toutes les lois du mouvement des corps microscopiques et macroscopiques ont un caractère objectif : elles ne dépendent ni de l'homme — le sujet connaissant — ni des différents moyens à l'aide desquels il découvre les lois de la nature. Le caractère objectif de toutes les lois du monde matériel témoigne aussi de l'objectivité des rapports de causalité entre les phénomènes de la nature, rapports qui ont un caractère universel et en même temps tout à fait défini dans les processus différents et multiples du monde.

La dépendance causale est qualitativement différente dans le cas du mouvement des microparticules et dans celui du mouvement des corps macroscopiques. La loi générale de la liaison causale des phénomènes se manifeste ainsi sous les formes les plus diverses. Dans toute une série de processus naturels, cette loi se manifeste sous la forme d'une dépendance univoque et immédiate ; cependant, dans de nombreux processus, la dépendance causale se manifeste dans une combinaison plus complexe de relations et de liaisons, tant immédiates que médiates ; de plus, c'est aussi bien l'action causale que son résultat, sous des formes et dans des conséquences diverses, qui peuvent être compliqués et multiformes. D'où la thèse dialectique selon laquelle il existe dans la nature une diversité

infinie et inépuisable de formes et de types de rapports de causalité, rapports que l'homme découvre de plus en plus complètement et profondément à chaque nouvelle étape de la connaissance du monde matériel.

Dans la science physique, c'est la loi *dynamique* qui exprime la dépendance causale univoque et immédiate. L'idée fondamentale en est la suivante : si l'on connaît les conditions initiales d'un système physique mécanique quelconque (par exemple les coordonnées et les impulsions conjuguées pour un système de points matériels), le comportement de ce système est entièrement connu et déterminé d'une façon univoque par l'équation du mouvement [1]. La mécanique classique macroscopique, où la loi dynamique se trouve être, sous cette forme, une bonne approximation, a obtenu d'énormes succès pratiques. Naturellement, cela engendra la confiance en la justesse absolue des principes du déterminisme mécanique et suscita de plus des tentatives tout à fait erronées pour créer une image dynamique (mécanique) absolue du monde en accord avec l'idéal énoncé par Laplace dans son œuvre célèbre : *Essai philosophique sur les probabilités ;* Laplace y parlait d'une intelligence idéale, qui embrasserait aussi bien le futur que le passé. C'est là l'expression ultime du déterminisme mécanique classique, qui se fonde sur les principes de la mécanique classique. Comme nous l'avons remarqué plus haut, en raison du caractère approché de cette forme de causalité, il n'y a aucune raison logique ou réelle de construire une telle image dynamique absolue du monde.

L'absolutisation du déterminisme mécanique fut battue en brèche pour la première fois à l'occasion de généralisations théoriques concernant la forme thermique du mouvement de la matière. On sait que l'appareil mathématique de la théorie physique de la chaleur — la thermodynamique — a été construit, lui aussi, d'après les principes du déterminisme mécanique. Cependant, des difficultés de principe sont apparues lorsque l'on essaya de comprendre la

1. Plusieurs conditions doivent être de plus remplies : il faut qu'à chaque instant soit donné un champ de force, que l'on ait fait des hypothèses définies au sujet de la déformabilité ou de la non-déformabilité et de la stabilité du système, au sujet du caractère de la transmission de l'interaction, etc. L'existence de cette « queue » de conditions supplémentaires montre que l'idéal laplacien des liaisons causales a un caractère approximatif. Cf. D.I. Blokhinzev : *Uspekhi fizitcheskikh Naouk*, 45, 195 (1951) surtout pages 204 à 213 (article traduit dans *Questions scientifiques*, t.1, Physique, Editions de la Nouvelle Critique 1952. *N.d.l.R.*).

ture des lois thermodynamiques à l'aide de la mécanique classique, mpte tenu de la structure atomique des corps macroscopiques.

On tenta au début d'expliquer ce fait par des raisons purement chniques. A titre de mesure temporaire, que l'on considérait comme iparfaite, on proposa la mécanique statistique, qui fait une place im- ›rtante à la notion de probabilité, étrangère aux principes du déter- inisme mécanique. Les physiciens firent des efforts persévérants pour carter la statistique et démontrer le caractère dynamique des lois ther- odynamiques. Ils rattachaient le traitement statistique de la thermo- ynamique, non pas à la spécificité de ses lois, mais seulement à notre norance du détail du mouvement atomique dans les corps macrosco- iques. Il semblait que derrière les lois probabilistes de la physique atistique imparfaite se cachaient des lois dynamiques précises du ouvement des atomes.

Cependant, un tel point de vue est radicalement erroné. Ce qui se asse, ce n'est pas que nous ignorons quelque chose et sommes donc orcés de recourir « à contre cœur » aux lois de la probabilité, mais ien que le caractère statistique des lois de la thermodynamique est n fait objectif. Il est tout à fait indifférent pour ces lois que nous onnaissions ou ne connaissions pas le détail des mouvements atomi- ues, car ce détail représente ici des rapports de causalité sans impor- ance, qui ne sont pas déterminants pour lesdites lois thermodynamiques bjectives.

La question des rapports entre les lois dynamiques et statistiques les phénomènes de la nature s'est posée avec une acuité particulière ors des nouveaux progrès en physique atomique et de la création d'une héorie atomique conséquente, la mécanique quantique. Si, dans le lomaine de la physique classique, la mécanique était considérée comme étant en parfait accord avec les principes du déterminisme mécanique, dans le domaine de la physique atomique, on dut renoncer à considérer ces principes comme absolus. Tout le contenu de la mécanique quan- tique nous montre clairement que les lois du mouvement des micro- particules ont un caractère statistique.

La mécanique quantique est une grande conquête historique de la pensée humaine ; elle représente un pas en avant important et fécond dans la connaissance des lois du mouvement de la matière à l'échelle atomique : elle nous découvre les traits spécifiques des phénomènes microscopiques, en première approximation, mais plus exactement que ne le fait la théorie classique. Il est évident que les nouvelles lois étudiées par la mécanique quantique ne peuvent être déterminées par l'ensemble limité de liaisons causales qui forme la base des lois dyna-

miques de la mécanique classique. La dépendance causale des phénomènes se découvre ici sous une forme beaucoup plus complète et contradictoire, et cela parce que notre connaissance atteint un plus grand nombre de liaisons et de rapports caractéristiques du mouvement des micro-objets matériels.

Examinons maintenant les traits fondamentaux qui distinguent la théorie quantique de la physique classique. Ils nous montreront clairement la profondeur de la théorie atomique, qui lui permet d'expliquer plus complètement que la mécanique classique, un ensemble de phénomènes plus vaste.

Le *premier* trait fondamental de la mécanique quantique, c'est que l'on y tient compte d'une façon plus conséquente de l'unité matérielle du monde naturel et des lois de son évolution. Dans la théorie quantique, tout phénomène atomique est envisagé en liaison constante avec son milieu matériel, et leur interaction possède un caractère universel et absolu. L'existence « indépendante », « individuelle » — c'est-à-dire détachée de leur milieu — des micro-objets est considérée comme relative et grossièrement approchée. L'interaction entre le micro-objet et son milieu n'a plus le caractère d'une force « extérieure » mais nous amène à considérer le micro-objet et son milieu comme un système unique. Evidemment, la mécanique quantique actuelle ne peut nullement être considérée comme « la dernière étape de la science » ; c'est pourquoi elle ne tient compte que d'une façon approchée des liens entre le micro-objet et son milieu ; mais ce qui est important, c'est que, même dans le cadre de cette approximation, on ne peut plus exclure par principe ces liens objectifs, qui sont déterminants pour les lois du mouvement des microparticules.

Le premier trait fondamental de la théorie quantique, formulé sous cette forme générale, a l'air quelque peu abstrait, mais il se concrétise si l'on se tourne vers les deux autres traits — *l'atomisme* des phénomènes microscopiques et leur nature double, *à la fois corpusculaire et de champ.*

Les conceptions atomiques sont apparues dans la physique il y a très longtemps. Cependant l'atomisme actuel diffère fortement des conceptions naïves sur les « atomes sphériques » obéissant aux lois de la mécanique classique. L'atomisme quantique n'est lié que d'une façon tout à fait approchée et non fondamentale à la localisation spatiale des micro-objets. La conception d'une localisation « rigoureuse » des atomes est apparue comme conséquence de notre obser-

tion quotidienne des corps macroscopiques, qui furent ramenés nplement à l'échelle atomique.

Dans le domaine des phénomènes microscopiques, l'atomisme se anifeste avant tout non pas dans une localisation des micro-objets éfinie de façon classique, mais dans *l'atomisme du mouvement, de interaction*. Ce n'est pas un hasard si la constante fondamentale e la mécanique quantique est le *quantum d'action* : la constante de lanck, $h = 6{,}62.10^{-27}$ erg-s. En mécanique quantique, à côté es valeurs discontinues des masses au repos des microparticules lectrons, positons, nucléons, etc.) et de leurs charges électriques et ucléaires, il y a ainsi quantification de l'énergie, des moments nétique et magnétique et des autres caractéristiques dynamiques.

L'atomisme de la forme électromagnétique de la matière se ra-ène à l'existence de quanta de lumière (photons), avec une éner-ie, une impulsion et un moment cinétique discontinus, mais les pho-ons n'ont pas de masse au repos et ne possèdent pas de charge lectrique ; on n'a donc pas le droit de parler si peu que ce soit à eur sujet de localisation spatiale classique. Dans cette forme plus pprofondie de l'atomisme se manifeste le premier trait fondamental le la physique atomique actuelle — le caractère absolu de l'in-eraction. Par suite de la relativité de « l'individualité » des micro-articules, leurs propriétés discontinues apparaissent en premier lieu lans leur liaison avec leur milieu matériel, et non dans leur locali-ation spatiale. En même temps, la mécanique quantique explique ntièrement pourquoi les corps macroscopiques ont une localisation spatiale fortement marquée.

La physique classique, par suite de son caractère approché, ne pouvait expliquer entièrement les propriétés de la matière aussi bien sous sa forme de lumière que sous sa forme de substance. Dans le premier cas, seules étaient expliquées les caractéristiques ondulatoires du champ électromagnétique et, dans le second, les propriétés discontinues de la substance. En fait, il apparut que l'atomisme aussi bien que les propriétés ondulatoires continues sont universels et inhérents à ces deux formes de la matière en mouvement — la substance et la lumière. La nature double, *corpusculaire et de champ*, des phénomènes microscopiques ne pouvait pas être expliquée par la mécanique et l'électrodynamique classiques. C'est justement ici que les principes du déterminisme mécanique entrèrent le plus en contradiction avec la nature dialectique des phénomènes microscopiques. La causalité mécanique exigeait l'existence soit de particules, soit d'un

champ, et les faits montraient qu'en réalité nous avions affaire à un phénomène plus compliqué et plus riche de propriétés, ne se manifestant que dans quelques cas particuliers sous une forme rappelant de loin une particule classique ou un champ classique.

L'atomisme de l'action et surtout la nature double, corpusculaire et de champ, des particules montrent clairement que les micro-objets sont *qualitativement* différents des corps macroscopiques, que dans les phénomènes microscopiques ressortent au premier plan, comme caractères fondamentaux, des liaisons et rapports de causalité qui ne jouaient pas un rôle important dans les phénomènes macroscopiques. Ces rapports sont beaucoup plus nombreux, riches et divers car ils découvrent plus profondément la structure infiniment complexe de la matière. Il importe de souligner que ce que nous appelons microparticules ne ressemble absolument pas aux corps macroscopiques ; il y a là un brusque changement qualitatif, déterminé par des différences quantitatives de plusieurs ordres de grandeur. C'est pourquoi toute tentative d'appliquer au domaine des phénomènes microscopiques les conceptions classiques avec leur idéal, le déterminisme laplacien, est absolument sans objet et antiscientifique.

Après avoir énuméré les traits fondamentaux du traitement quantique des phénomènes microscopiques, nous pouvons examiner plus concrètement le caractère des lois qui régissent ces phénomènes, lois qu'étudie la mécanique quantique actuelle. Nous avons déjà mentionné plus haut leur caractère statistique. Il faut remarquer avant tout que les lois stastitiques dénotent l'existence de facteurs contingents. Mais il est indispensable de rappeler que l'existence de liaisons contingentes dans les phénomènes microscopiques, et en général dans la nature, n'entraîne nullement la négation du fait que ces phénomènes obéissent à des lois objectives. Les liaisons et relations probabilistes ou contingentes, qui ne sont pas déterminantes pour un phénomène matériel donné, sont aussi objectives que les rapports directs immédiats qui caractérisent le côté dynamique de la loi étudiée.

L'opinion selon laquelle les lois dynamiques ont un caractère objectif et causal, alors que les lois statistiques expriment seulement tel ou tel degré de notre ignorance, pour largement répandue qu'elle soit, n'en est pas moins tout à fait injustifiée. A notre avis, l'essence de la loi statistique réside dans le fait qu'à la différence de la lia-

univoque et immédiate des lois dynamiques, nous avons ici une
son médiate, une interaction entre de nombreux facteurs diffé-
s, qui créent des lois dialectiquement contradictoires du mou-
ent de la matière, et en particulier des microparticules. Le
actère premier des lois statistiques est lié à la présence de causes
tiples qui déterminent le caractère contradictoire des rapports
e les divers facteurs dans le mouvement des microparticules.

Une étude plus poussée de la nature nous fera découvrir encore
s de rapports et liaisons qu'on ne pourra non plus ramener à quel-
loi dynamique ultime que ce soit, car le caractère infini et
puisable de la matière exclut toutes lois et causes « dernières »,
tes limites de la nature « dernières » et absolues.

Ainsi, dans toute loi statistique, nous devons distinguer l'ensem-
des liaisons *fondamentales* qui déterminent les traits essentiels
phénomène étudié, ainsi que la coexistence inévitable de liaisons
ntingentes objectives, qui ne déterminent cependant pas les traits
entiels du phénomène et sont donc sans importance à ce point de
. Mais par suite du caractère inépuisable du monde matériel,
liaisons contingentes existent *toujours* et toute théorie consé-
ente est obligée d'en tenir compte ; c'est pour cela qu'elle doit
cessairement contenir des estimations probabilistes de tel ou tel
énement.

A titre d'illustration, revenons à l'examen des rapports entre
thermodynamique et la mécanique statistique dans la physique
assique. Tant que nous négligeons la structure atomique des corps
acroscopiques, les lois de la thermodynamique nous paraissent pure-
ent dynamiques, comme le montre nettement l'appareil mathématique
la théorie. Cependant, quand on tient compte de la structure ato-
ique des corps et, par conséquent, de la grande variété des liaisons
atérielles, nous avons affaire à la thermodynamique statistique, où
conserve tout le contenu de la thermodynamique « dynamique », mais
apparaissent aussi des caractères statistiques (probabilités des états
icroscopiques, fluctuations, etc.). Ainsi, si l'on tient compte aussi
ien des liaisons déterminantes, qui se reflètent dans les équations
ynamiques de la thermodynamique, que des liaisons contingentes dé-
erminées par le mouvement des atomes qui forment les corps macros-
opiques, on enrichit la thermodynamique, bien que par là, dans
esprit d'un « mécaniste orthodoxe », celle-ci se transforme de théo-
e dynamique rigoureuse en théorie statistique, « de second choix ».

Les partisans du déterminisme laplacien ont toujours espéré qu'il

sera possible en fin de compte de triompher des difficultés (résoud le problème ergodique) et d'obtenir une thermodynamique rigoureus ment dynamique et tenant compte des mouvements atomiques. Ma ces espérances ont été vaines, car la mécanique des atomes elle-mêm s'avéra statistique. A la lumière de tout ce qui a été dit plus haut, devait en être ainsi. Il faut seulement élucider de quelle façon l traits dynamiques et statistiques s'unissent en mécanique quantique quelle est leur dialectique. Nous arrivons là à une question très in portante : quels sont donc les phénomènes microscopiques étudi par la mécanique quantique actuelle ? [2]

Pour répondre à cette question, nous devons rappeler l'histoire l'apparition des conceptions atomiques actuelles. Dans tous les ca nous avons affaire à deux « partenaires » : le micro-objet (ou système de micro-objets) et son milieu matériel *macroscopique*. C' par l'étude d'un tel ensemble de phénomènes que l'évolution de physique atomique actuelle *a commencé*. Nous devons ici soulign nettement que nous ne considérons absolument pas par là que le pr cipe agnostique de la limitation de notre connaissance du mon matériel doive présider aux mesures que nous faisons à l'aide d'a pareils macroscopiques. Nous ne faisons que constater le fait bi connu que les physiciens ont commencé à prendre connaissance d lois atomiques spécifiques en étudiant l'ensemble des processus o jectifs de la nature pour lesquels les liaisons causales déterminan

---

2. En rapport avec cette question, nous attirons l'attention du teur sur l'article de G.Y. Miakichev : « Quelle est la cause du caract statistique de la mécanique quantique? » (*Voprossy Filosofii*, 1954, 6, p. qui s'efforce de systématiser, en en donnant une analyse critique, points de vue existants sur la nature statistique des lois de la méca que quantique. Cependant quelques assertions de l'auteur appellent objections. Il est impossible d'être entièrement d'accord avec la criti du point de vue de D.I. Blokhinzev. Il faut encore éclaircir ce que l' teur entend par interaction du micro-objet avec le champ électroma tique. La matière sous sa forme électromagnétique a aussi une struct microscopique; le photon, c'est aussi un corpuscule qui obéit aux quantiques statistiques. Quand on lit l'article de G.Y. Miakichev, or aussi l'impression que malgré certaines réserves, l'auteur, à la suite D. Bohm, L. de Broglie et G. Vassails, admet l'existence de « paramè cachés » ou d'une double solution d'une particule d'allure classi strictement localisée dans l'espace et obéissant à des lois du mouvem strictement dynamiques. On ne peut pas non plus être d'accord a l'auteur sur son estimation du caractère des lois de la mécanique cla que, si l'on se rappelle le fait, bien connu maintenant et vérifié par pratique, que les lois classiques ne sont qu'une « moyenne » des lois tistiques de la mécanique quantique actuelle.

celles qui existent entre les microparticules et leur milieu *macrosique* (nous disons bien : milieu matériel *macroscopique*). Ce n'est un secret que ce milieu macroscopique possède lui-même une cture microscopique ; c'est pourquoi il existe encore un ensemble sidérable de liaisons et relations (contingentes y comprises) pour lois étudiées par la mécanique quantique actuelle. Mais c'est préément la présence de ces liaisons contingentes qui rend statistiques lois de la théorie quantique moderne.

Ainsi, la mécanique quantique actuelle n'étudie qu'un ensemble ité de phénomènes microscopiques, à savoir les propriétés des microticules qui se trouvent en interaction avec leur milieu matériel, nt la nature microscopique ne se manifeste dans les phénomènes diés que sous forme de liaisons et rapports contingents et indéternés, mais dont l'existence réelle entre en ligne de compte dans la éorie, dont elle rend les lois statistiques[3].

En rapport avec cette particularité des lois objectives étudiées par mécanique quantique, apparaît un rapport réciproque original entre e et la théorie classique. Cette dernière doit inévitablement faire rtie intégrante de la mécanique quantique, parce que nous nous limins pour le moment à l'étude des phénomènes dans lesquels les microrticules et leur milieu macroscopique sont en interaction (pour lui-ci ne sont essentielles que les propriétés macroscopiques expliées par la mécanique classique). Nous pouvons citer à ce propos un ssage de la monographie de l'académicien L.D. Landau et du ofesseur E.M. Lifchitz sur la mécanique quantique : « Habituelleent une théorie plus générale peut être formulée d'une façon logiuement close, indépendamment d'une théorie moins générale, qui t un de ses cas limites. Ainsi la mécanique relativiste peut être onstruite sur la base de ses postulats, sans aucune référence à la écanique newtonienne. Mais il est impossible par principe de foner la mécanique quantique sans se référer à la mécanique classiue (...) Ainsi, la mécanique quantique occupe une position très oriinale dans la série des théories physiques : elle contient la mécanique lassique comme cas limite (utile pour l'explication de phénomènes

3. Un tel point de vue sur la nature des lois statistiques de la mécaique quantique a été émis par l'un des auteurs de cet article (S.V.) et ublié dans son article « Le principe de causalité dans la physique atoique moderne », inclus dans le recueil *Le Matérialisme dialectique et es problèmes des sciences de la nature* (Editions de l'Académie des Scienes de l'U.R.S.S., 1957).

purement ou quasi-macroscopiques — *S.V. et G.K*) et en mêm temps elle a besoin de ce cas limite pour être valable »[4].

La circonstance indiquée amène à se servir largement des notions classiques en mécanique quantique, mais on les applique (à l'aide du principe de correspondance) non pas mécaniquement, mais en tenant compte de toute la spécificité des phénomènes microscopiques. Ces notions, en fait, ne sont plus classiques quand on les applique au « partenaire » microparticule. On peut illustrer cela par les relations d'incertitude (l'une des conséquences les plus importantes des équations fondamentales de la mécanique quantique) :

$$\Delta x \,.\, \Delta p_x \geqslant \frac{h}{4\pi},$$

(où Δx est la dispersion statistique des coordonnées et Δp_x la dispersion statistique de l'impulsion conjuguée). On voit par là que si l'on voulait appliquer aux microparticules la notion *classique* de coordonnée (en choisissant une dispersion $\Delta x = O$), il surgirait une difficulté lors de l'emploi de l'impulsion *classique* (dont la dispersion serait alors $\Delta p_x = \infty$).

Nous voyons donc que pour une particule quantique les notions même de coordonnée et d'impulsion portent un caractère *non pas* classique, mais nouveau, original. Il faut souligner aussi que ces relations ne possèdent pas seulement ce côté « négatif », qui limite le domaine d'application des notions *classiques* dans les phénomènes microscopiques étudiés par la théorie quantique, mais ont aussi, et c'est là leur signification principale, un immense contenu *heuristique*, car elles prédisent une multitude de *nouveaux* traits spécifiques des microparticules, liés à leur double nature corpusculaire et de champ. Il suffit de rappeler ici le rôle décisif des relations d'incertitude dans la découverte du nouveau modèle nucléonique du noyau atomique, des états stables des atomes, de l'existence d'une « énergie de zéro » dans l'hélium II liquide et dans de nombreux autres cas[5].

Bien entendu le caractère particulier des phénomènes atomiques nécessite un appareil mathématique propre, qui a été élaboré par

4. L. Landau et E. Lifchitz : *La Mécanique quantique*, t. 1, 1948, 12-13.

5. Il est presque évident qu'il est suffisant de montrer cet aspect des relations d'incertitude pour qu'apparaisse toute l'absurdité des tentatives faites pour les utiliser afin de prouver l'agnosticisme.

mbreux physiciens (W. Heisenberg, E. Schrödinger, M. Born, rac, Fock et autres). Cet appareil reflète entièrement tous les nouaux traits des lois du monde objectif traitées par la théorie. L'atosme des phénomènes quantiques se reflète dans cet appareil, preèrement par l'apparition de la constante de Planck h. Deuxièmeent, les variables dynamiques des microsystèmes sont représentées n pas par des nombres habituels ou des fonctions, comme dans la écanique classique, mais par des *opérateurs* obéissant à l'algèbre non ommutative [6]. Par exemple, si nous avons deux opérateurs $\hat{A}$ et $\hat{B}$, présentant deux caractéristiques données de la microparticule (par xemple les coordonnées et l'impulsion conjuguée), nous avons dans cas général la relation suivante :

$$\hat{A}.\ \hat{B}-\hat{B}.\ \hat{A}=\hat{C}\neq 0.$$

Il est important de noter que dans ces « relations de commutation », e membre de droite, l'opérateur $\hat{C}$, contient toujours le facteur h, 'est pourquoi, quand h tend vers zéro, c'est-à-dire dans le cas limite lassique, tous les opérateurs commutent toujours et deviennent des ariables classiques ordinaires. Même dans le cas de la mécanique quantique, pour certaines paires d'opérateurs, la grandeur $\hat{C}=0$, c'est-à-dire que les opérateurs $\hat{A}$ et $\hat{B}$ commutent. Les relations de commutation des opérateurs sous leur forme la plus générale traduisent les propriétés discontinues des phénomènes microscopiques.

Les caractéristiques ondulatoires des micro-objets trouvent dans le formalisme mathématique leur meilleur reflet, soit à l'aide de la fonction d'onde ψ, soit à l'aide des potentiels quantifiés du champ. Dans la fonction ψ se reflète aussi le caractère statistique des lois de la mécanique quantique. En particulier cela ressort du fait qu'il est possible, à l'aide de la fonction d'onde, de calculer aussi bien la probabilité de la localisation du système microscopique que la valeur moyenne de n'importe laquelle de ses variables dynamiques. En effet, la densité de probabilité de la position d'une microparticule dans l'espace des variables q_1, q_2, ..., q_t (qui peuvent être des coor-

6. C'est par cela que l'appareil mathématique reflète en premier lieu le caractère spécifique des caractéristiques dynamiques des microsystèmes et la différence qui les sépare des grandeurs analogues de la macromécanique.

données ou des impulsions aussi bien habituelles que généralisées) es définie par le carré du module de la fonction ψ : $|\psi (q_1, q_2, \ldots, q|^2$ e la valeur moyenne d'une grandeur quelconque définie par l'opéra teur A est égale à l'intégrale :

$$\bar{A} = \int \psi^* \hat{A}\psi dq_1 \, dq_2 \cdots dq_t,$$

à prendre sur tout l'intervalle des valeurs de la variable q.

Il ne faut pas croire qu'en mécanique quantique on ne peut qu prédire statistiquement les valeurs moyennes de telle ou telle de grandeurs qui définissent les propriétés du système microscopique On peut déterminer en outre leur valeur exacte (valeur propre), ce qui constitue dans la majorité des cas le problème principal de la mé canique quantique ; dans le cas en question, comme le remarque ave raison D.I. Blokhinzev[7], puisque la dispersion statistique est égale zéro, on a une nouvelle possibilité « d'étudier par une méthode sta tistique les propriétés *individuelles* des microparticules ». Cela illus tre parfaitement le fait que, en étudiant les lois statistiques des phé nomènes microscopiques, nous pouvons aussi connaître les particula rités spécifiques de ceux-ci qui se manifestent dans les atomes isolé (par exemple, déterminer leur spectre énergétique, etc.). C'est pou cela que notre propre nature macroscopique et celle de notre appareil lage expérimental ne peuvent jamais jouer le rôle de limite de l connaissance des lois objectives des phénomènes microscopiques.

Il est essentiel aussi de noter que les variations de la fonctio d'onde et des opérateurs des systèmes quantiques sont définies pa des équations différentielles convenables (par exemple l'équation d Schrödinger). C'est justement cette circonstance qui exprime dan l'appareil mathématique le côté *dynamique* des lois atomiques : l principe simple de causalité se trouve aussi dans les lois de la méca nique quantique, mais il s'y rapporte à la fonction d'onde, au opérateurs, à leurs valeurs moyennes, et il est loin d'épuiser tout la richesse des liaisons et des relations causales des lois statistique des phénomènes microscopiques. Ainsi, l'appareil mathématique d la théorie quantique permet de voir en détail la combinaison de côtés dynamique et statistique des phénomènes étudiés et de com prendre pleinement aussi pourquoi auparavant les lois de la macro physique nous paraissaient rigoureusement dynamiques alors que, pa

7. Voir *Voprossy Filosofii*, 1952, 6, p. 174.

contenu physique, elles ne sont qu'une « moyenne statistique » de de la mécanique quantique plus rigoureuses et générales (quoi-statistiques).

Nous n'avons pas la possibilité de nous arrêter ici sur un chapitre important de la mécanique quantique, la théorie des mesures tiques. Remarquons seulement que cette théorie reflète les lois ctives des phénomènes microscopiques et que, si on l'interprète tement, elle ne peut en aucune façon servir de base à l'agnosti-e, malgré toutes les tentatives des philosophes idéalistes. Il est tout it logique et naturel qu'un système atomique ne puisse pas ne ressentir l'action matérielle des appareils et instruments pendant rocessus de mesure. De plus, en agissant sur les objets quantiques, appareils de mesure fixent et expriment dans tous les cas leurs priétés objectives avec tous leurs caractères spécifiques, et contri-nt par là à approfondir la connaissance de la réalité.

Nous pouvons donc affirmer que, dans son ensemble, la méca-ne quantique permet à l'homme de pénétrer plus profondément les des phénomènes microscopiques, de mettre en lumière leur na-dialectique contradictoire et la différence qualitative qui les are des phénomènes macroscopiques. Par là la théorie quantique e l'homme dans sa lutte pour se rendre maître des puissantes forces relles recélées par les mouvements intra-atomiques. La mécani-quantique et son développement, la théorie quantique des champs, une nouvelle confirmation de la pensée de Lénine : la maîtrise l'homme sur la nature est le résultat du reflet objectivement exact lois du monde matériel dans la connaissance.

II

La mécanique quantique étant l'une des théories scientifiques les s importantes à l'heure actuelle, a tout naturellement suscité au-r d'elle une lutte extrêmement ardente entre diverses tendances ilosophiques. Cette lutte a mis en présence en premier lieu les deux nceptions philosophiques du monde opposées, le matérialisme et déalisme.

L'interprétation matérialiste dialectique des problèmes de la mé-nique s'oppose à l'interprétation dite « de Copenhague », qui

est l'expression de l'idéalisme physique dans ces questions. Les p losophes marxistes doivent lutter fermement contre toute espèce d' terprétation idéaliste de la mécanique quantique et doivent, ce f sant, faire triompher d'une façon conséquente le point de vue *dial tique* (sur la base de la conception matérialiste, s'entend). En mê temps, nous estimons utile de noter les hésitations entre le matér lisme et l'idéalisme qu'on observe chez les savants physiciens plus éminents, qui se trouvent dans leur ensemble sous l'influence la philosophie idéaliste.

Reportons-nous en premier lieu à la contribution de W. Heis berg dans le recueil consacré au 70e anniversaire de N. Bohr [8], et second lieu à l'intéressante discussion qui se déroule depuis quelq années dans la revue progressiste française *La Pensée*.

Werner Heisenberg est l'un des créateurs de la mécanique qu tique moderne et l'un des plus grands physiciens de notre temps. plus, il prend systématiquement position sur les problèmes gnosé giques de la physique, en développant en mécanique quantique idées de l'interprétation de Copenhague. Il est indubitable que c interprétation est idéaliste dans son ensemble. Elle a souvent été tiquée dans la presse scientifique soviétique [9]. Mais nous avons l pression que, au cours de cette critique, on a insuffisamment fait marquer les hésitations entre le matérialisme et l'idéalisme qui ava inévitablement lieu chez des savants comme Bohr et Heisenberg par leurs recherches physiques, ont profondément pénétré la dia tique objective de la nature.

L'article de W. Heisenberg cité plus haut est extrêmemen gnificatif et intéressant à ce point de vue. Dans son ensembl représente une nouvelle tentative pour défendre l'interprét idéaliste de Copenhague ; l'auteur y énonce cependant une séri jugements contradictoires au point de vue philosophique. Tout d'al il divise les adversaires de cette interprétation en trois groupes. mièrement, ceux qui acceptent le côté expérimental de la mécan quantique, mais rejettent le langage philosophique de l'école de penhague et le remplacent par un autre. L'auteur classe dan groupe A.D. Alexandrov, D.I. Blokhinzev, D. Bohm, F. E

8. *N. Bohr and the development of physics*, Londres 1955.
9. Cf., par exemple, la monographie de M.E. Omelianovski : *Que philosophiques de la mécanique quantique*, Editions de l'Académi Sciences de l'U.R.S.S., 1956.

. de Broglie, R. Feynman et d'autres. Deuxièmement, un groupe e savants, dont L. Jànossy, qui s'efforcent de modifier le contenu ême de la mécanique quantique et obtiennent dans cette voie des réiltats différents des résultats ordinaires. Troisièmement, le groupe es physiciens qui rejettent en bloc la mécanique quantique en consiérant que ses principes fondamentaux ne sont pas satisfaisants, mais ui ne proposent en échange aucune solution positive. Ce groupe omprend A. Einstein, E. Schrödinger, M. von Laue. Mais, outre eurs différences, ces trois groupes ont ceci de commun, dit Heienberg, qu'ils tendent vers la conception de la réalité de la physique lassique, « vers l'ontologie du matérialisme, vers l'idée d'une réalité bjective du monde ». Or, d'après Heisenberg, cela est impossible, u bien « n'est que partiellement possible ». Il exprime de nouveau ette idée à la fin de l'article en disant que « l'ontologie du matériaisme est basée sur l'illusion que ce genre d'existence peut-être extraolé dans le domaine atomique », cependant, à son avis, « cette exrapolation est impossible ».

Il est indéniable que la négation de la réalité objective du monde contenue dans ces assertions d'Heisenberg est sans fondement, car cette réalité est démontrée par la pratique humaine des milliards de fois. Mais l'affaire se complique, car dans son esprit il identifie souvent la réalité objective et la notion de « réalité de la physique classique ». Alors qu'il faut distinguer deux choses : en premier lieu, le caractère objectif des processus physiques de la nature qu'étudie la physique classique et, en second lieu, le tableau du monde qui a été donné par la physique classique, étape de la connaissance, degré d'approximation tout à fait imparfait de nos connaissances. Heisenberg a raison quand il nie le caractère absolu du tableau classique du monde et on ne doit comprendre que dans ce sens sa négation de la « réalité de la physique classique ». Ici, à notre avis, il juge les vieilles conceptions classiques en adoptant le point de vue dialectique spontané de la nouvelle physique quantique. Mais nier l'image classique du monde ou admettre son étroitesse n'entraîne absolument pas nécessairement la négation idéaliste de la réalité objective des processus quantiques et des microparticules, malgré toute leur originalité qualitative et les différences qui les séparent des processus et des corps étudiés par la physique classique.

Dans l'article en question, W. Heisenberg énonce plus loin une série d'affirmations philosophiques à notre avis exactes et découlant de son matérialisme spontané de physicien. Il oppose l'interpréta-

tion de Copenhague — avec, bien entendu, sa conception propre de la « réalité » — à l'interprétation positiviste, et dit justement que cette dernière se base sur « les perceptions sensibles de l'observateur comme éléments de la réalité ». Il y oppose aussitôt la réalité comme « fon- dement de toute interprétation physique », bien qu'il souligne que l'interprétation de Copenhague décrit les choses et les processus en se servant de notions classiques. Dans un autre passage, il remarque de même que « l'interprétation de Copenhague est basée sur l'existence de processus qui peuvent être décrits simplement avec les notions d'espace et de temps, c'est-à-dire avec les notions classiques qui, de cette façon, forment notre « réalité », au sens convenable » (p. 27).

Les vues qui s'expriment dans ces affirmations manquent d'esprit de suite ; la terminologie philosophique est confuse ; en même temps l'idée matérialiste que les théories physiques et leurs différentes inter- prétations ont un fondement objectif y est nettement formulée. Cel- est encore souligné par d'autres affirmations d'Heisenberg, comm par exemple : « Les états réels peuvent toujours être représenté comme des vecteurs dans l'espace de Hilbert (...). Cette interpréta- tion contenait aussi des éléments statistiques bien connus, qui son apparus il y a longtemps dans l'expérience (par exemple dans l'émi- sion de rayons α, l'effet photoélectrique, etc.)». Ces affirmations, et d'autres semblables, montrent que W. Heisenberg use d'une méthode gnoséologique juste pour apprécier une série de positions de la méca- nique quantique, en particulier quand il souligne le rôle de l'expéri- mentation dans les théories physiques. En ce qui concerne la tenta- tive du physicien hongrois L. Jànossy pour apporter des modificatio à la mécanique quantique, Heisenberg dit avec raison que l'on ne pe rien en adopter tant que l'expérimentation ne nous oblige pas à faire [10].

Enfin, on ne peut pas ne pas être d'accord avec Heisenberg quan il critique les vieilles conceptions mécanistes et dit que les adepte

10. L'ambiguïté de l'utilisation des termes « réalité de la physiq classique » et «objectivité » est totalement éliminée si l'on se rappelle que nous avons indiqué plus haut. La physique classique a pour ob d'investigation des lois objectives du monde réel plus approximativ alors que la mécanique quantique étudie des phénomènes plus subt mais qui touchent aux conceptions classiques même en dehors du limite classique, car ce sont des processus où les relations et les rappo déterminants sont des relations et rapports objectifs entre les systèn microscopiques et leur milieu macroscopique.

ces conceptions veulent verser le vin nouveau dans de vieilles outres rcées sur toutes les coutures, au lieu de « se réjouir de ce vin nouau ». Sans doute l'idée générale est juste, car les nouvelles lois de mécanique quantique ne peuvent s'insérer dans les vieilles concepons du déterminisme mécaniste. Cependant W. Heisenberg ne découvre pas de nouvelles formes de liaisons et rapports de causalité ans le monde microscopique ; au contraire, il en arrive souvent à er l'existence de telles formes, comme cela découle par exemple principe de complémentarité dans l'interprétation traditionnelle e Copenhague, interprétation dont la nature idéaliste a été critiquée lus d'une fois en partant de positions matérialistes dialectiques.

Examinons rapidement les arguments opposés dans ce même arcle par Heisenberg aux savants soviétiques A.D. Alexandrov et).I. Blokhinzev. Tout d'abord, il remarque que ces savants accepent sans réserves l'interprétation de Copenhague de la mécanique uantique au point de vue de son aspect physique spécial et de on fondement expérimental. Mais il ajoute qu'ils jugent les affirmaons de principe en partant non des positions de la science, mais du oint de vue de leur philosophie, celle de Lénine. Ici, Heisenberg ne omprend pas que la philosophie du matérialisme dialectique se fonde ur les plus importants résultats de la science et que la physique acuelle, y compris la mécanique quantique dans son contenu scientiique véritable, apporte de nouvelles confirmations aux thèses du maérialisme dialectique. C'est pourquoi on n'est pas fondé à opposer a science et la philosophie des savants soviétiques.

W. Heisenberg accuse A.D. Alexandrov de prendre « l'offensive contre l'introduction de l'observateur » dans les processus quantiques. Il pense que cette « offensive » est injustifiée, car l'introduction de l'observateur ne doit pas mener au subjectivisme. Il écrit à ce sujet que « l'on ne devrait pas penser à tort que l'introduction de l'observateur suppose que l'on introduit des traits *subjectifs* dans la description de la nature » (p. 17 ; souligné par nous *S.V. et G.K.*). « La fonction de l'observateur est seulement d'enregistrer les résultats, c'est-à-dire les processus dans l'espace et dans le temps » (p. 18). Ces affirmations d'Heisenberg sont exactes. La différence est la suivante : chez Alexandrov, la juste compréhension du rôle de l'appareil est liée à toute la conception matérialiste du monde, alors qu'on trouve chez Heisenberg tout un système de jugements contradictoires, souvent éclectiques et que seules certaines de ses affirmations sont justes.

En effet, dans son article, Alexandrov énonce des opinions ma-

térialistes exactes, qui rejettent tout subjectivisme rattaché à l'introduction d'un observateur. Il dit avec raison que toute mesure est une action sur le système quantique ; elle représente avant tout « une modification des conditions macroscopiques » dans lesquelles on étudie tels ou tels processus microscopiques. Il souligne que la fonction ψ est une « caractéristique de l'état objectif des particules » et qu' « il faut comprendre la mécanique quantique tout entière comme une théorie de processus objectifs »[11].

W. Heisenberg accuse D.I. Blokhinzev d'examiner les lois du monde microscopique au point de vue des ensembles quantiques, ce qui introduit un élément d'inconnu et « contient une information relative au degré de connaissance du système par l'observateur » (pp. 24, ...). Premièrement, les ensembles quantiques existent tout à fait indépendamment du fait que l'homme les étudie ou non. C'est pourquoi l'appartenance de la microparticule à un ensemble quantique déterminé est une propriété objective des processus microscopiques étudiés par la mécanique quantique actuelle, c'est-à-dire des processus où le système microscopique et son entourage *macroscopique* sont des partenaires égaux en droits. Deuxièmement, « l'élément d'inconnu » ou « le degré défini d'ignorance » existent effectivement, aussi bien dans la mécanique quantique actuelle qu'autrefois, à un degré beaucoup plus élevé, dans la physique classique, car c'est là une loi de développement de la connaissance du monde : à chaque instant nous ne sommes en possession que d'une vérité relative, nous ne reflétons la diversité infinie des rapports et liaisons du monde réel qu'avec un certain degré de précision. Tout ceci se rapporte aussi entièrement à la mécanique quantique ; toutes ses idées véritablement scientifiques garderont encore leur signification dans le futur, mais au cours du développement indéfini de la science, nous découvrirons en outre une multitude de lois nouvelles, déterminées par des liaisons et des rapports objectifs plus profonds. Cependant rappelons encore une fois que l'essentiel, pour le caractère statistique des lois mécaniques quantiques, ce n'est pas que nous ignorions quelque chose, mais bien que ces liaisons encore non découvertes, bien qu'elles existent, ne sont pas déterminantes pour les phénomènes étudiés. En conclusion, on peut dire qu'il n'y a aucune contradiction entre les raisonnements de D.I. Blokhinzev — et leur interprétation par Heisenberg — et les lois de l'évolution de la connaissance humaine.

11. Cf. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*, 19[illegible] *84*, 253.

Ces dernières années s'est déroulée dans la revue française *La 'ensée* une très importante discussion sur des questions de mécanique uantique ; les physiciens français s'y efforcent, en se plaçant à un oint de vue matérialiste, d'apprécier de l'état où se trouve la théoie quantique et de résoudre ses contradictions. Ces contributions léveloppent des idées matérialistes de P. Langevin et de L. de 3roglie et représentent un événement notable dans la lutte idéologique générale des forces de progrès contre la philosophie idéaliste bourgeoise et sa pénétration dans la science.

Les auteurs de ces articles, l'élève de L. de Broglie J.-P. Vigier, Fr. Halbwachs et d'autres, en soutenant le point de vue matérialiste ur l'interprétation des phénomènes atomiques, parlent en toute netteté le l'importance du matérialisme *dialectique* pour la compréhension de l'essence et du caractère contradictoire des lois de la mécanique quantique ; ils critiquent les conceptions idéalistes de l'école de Copenhague. Dans leurs articles, ils attribuent une grande valeur aux travaux des savants soviétiques sur les questions philosophiques de la mécanique quantique. Ces savants français luttent avec nous, en partant de positions philosophiques communes, contre l'idéalisme physique. Ils soulignent le caractère objectif des processus atomiques, ils soutiennent fermement le principe du déterminisme dans son application aux phénomènes microscopiques, en critiquant le point de vue indéterministe des idéalistes physiques. Tout cela mérite indiscutablement l'attention et l'examen les plus sérieux. Nous partageons entièrement l'opinion de la rédaction de la revue *La Pensée*, qui souligne dans les « chapeaux » des articles de mécanique quantique l'extrême importance de l'interprétation causale pour la conception matérialiste des phénomènes physiques en général (1955, 61, p. 35). Comme on le sait, les articles des physiciens français E. Schatzman, E. Cotton, G. Vassails et J.-P. Vigier, publiés dans *La Pensée* en 1952 et 1953, ont déjà trouvé un écho dans la presse soviétique. Nous nous arrêterons ici sur les dernières contributions de J.-P. Vigier, Fr. Halbwachs et L. de Broglie (1955-1956).

Dans son article « Une tentative pour édifier une microphysique matérialiste » (*La Pensée*, 1955, 61). Fr. Halbwachs s'efforce de développer les idées que J.-P. Vigier a énoncées dans son article « L'objectivité des lois de la nature » (*La Pensée*, 1953, 51). Tout d'abord, Fr. Halbwachs se propose d'élucider la nature de la combinaison dialectiquement contradictoire des propriétés corpusculaires et ondulatoires des micro-objets, et énonce nettement ses po-

sitions philosophiques initiales de partisan actif du matérialisme dialectique. En se prononçant de façon conséquente contre les positions idéalistes de l'interprétation de Bohr, contre sa conception positiviste de la réalité du monde microscopique et le subjectivisme dans la conception du rôle des appareils dans la mécanique quantique, Fr. Halbwachs part des deux principes fondamentaux suivants : 1° *la matière existe objectivement* et 2° *la matière est inépuisable* (p. 39). C'est pourquoi, dit-il, l'indéterminisme de Bohr et le déterminisme mécanique de Laplace se trouvent dénués de fondement, car le monde matériel objectif est inépuisable et infini. C'est justement pour cela qu'il souligne que ... « la loi causale pure (c'est-à-dire purement dynamique au sens de Laplace, *S.V. et G.K*) est une abstraction »... « Loi causale et loi de probabilité sont indissolublement liées, sont deux faces inséparables de la réalité » (p. 40). Il faut... « rechercher une synthèse dialectique conforme à l'infinie richesse du réel » (p. 41). Sans aucun doute, ces positions philosophiques de Fr. Halbwachs témoignent de son aspiration à triompher de l'interprétation idéaliste des lois de la mécanique quantique en partant des principes du matérialisme dialectique.

Il est indispensable de noter les mêmes positions de principe justes chez J.-P. Vigier dans son récent article « Remarques sur l'article du professeur Terletski » (*La Pensée*, 1955, 64). Il oppose nettement deux tendances dans la compréhension des problèmes de la mécanique quantique contemporaine : celle du matérialisme, représentée par les savants soviétiques, L. de Broglie, D. Bohm et d'autres, et celle de l'idéalisme, représentée par l'école de Copenhague (J.-P. Vigier cite les noms de Bohr et de Rosenfeld). Il se refère à ce propos à l'article de Lénine : *Dix questions au conférencier* où, dans les questions 3 et 7, Lénine montre que « la théorie de la connaissance du matérialisme dialectique se fonde sur l'admission de l'univers extérieur reflété dans le cerveau humain » et que « les idées de causalité, de nécessité, d'action des lois, etc., reflètent dans la tête de l'homme les lois de la nature » [12]. Quant à la tendance de l'école de Copenhague, J.-P. Vigier l'apprécie comme empiriocriticiste et lui oppose les principes de la théorie de la connaissance du matérialisme dialectique.

Signalons enfin le récent article de L. de Broglie « l'Interprétation de la Mécanique odulatoire » [13]. L'auteur y occupe la positi

12. Lénine : *Matérialisme et Empiriocriticisme*, Ed. Sociales 1948, p. 3
13. *Atomes*, 1956, 118.

d'un matérialiste conséquent. Il indique que la notion de nature double, corpusculaire et ondulatoire, des micro-objets découle de l'expérience et représente un phénomène objectif. La fonction d'onde, d'après L. de Broglie, est une notion qui a un fondement réel dans la réalité même. Le rôle de l'observateur et de sa conscience se réduit à la « constatation d'un état de choses qui existe indépendamment d'elle » (p. 10). Enfin, en parlant des perspectives du développement de la théorie quantique, L. de Broglie indique qu'il faut arriver à la description la plus complète possible de la réalité physique (cf. pp. 5-11). L. de Broglie croit que c'est justement cette voie qui mène vers la solution des contradictions que contient, à son avis, la mécanique quantique.

Nous devons maintenant donner une appréciation objective du *schéma physique concret* que proposent L. de Broglie et ses disciples et à l'aide duquel ils veulent découvrir la nature du caractère statistique de la mécanique quantique. Il est indispensable de noter ici que des positions philosophiques justes sont d'une extrême importance pour le choix d'une voie féconde pour la recherche scientifique, mais cela ne signifie pas que tous les problèmes physiques concrets trouveront automatiquement leur solution, et encore moins que l'on puisse suppléer aux bases expérimentales et aux résultats de la physique. J.-P. Vigier et Fr. Halbwachs, en particulier, le disent avec raison dans leurs articles.

L'essentiel, dans le schéma physique proposé par de Broglie, Vigier et autres, c'est le recours à une « *double solution* », dont L. de Broglie a été le premier à proposer l'idée en 1927. Voici en bref l'essentiel de cette théorie, reprise par eux après les travaux de D. Bohm[14]. Le but principal de ce nouveau schéma est, d'après L. de Broglie, « d'unir étroitement » le corpuscule et l'onde en insérant convenablement le corpuscule dans le processus ondulatoire. On y parvient par le moyen de la « double solution ». Comme l'affirment Vigier et Halbwachs en se basant sur les idées de L. de Broglie, l'équation d'onde admet deux solutions : l'une d'elles contient une région singulière où la particule conserve son individualité et reste strictement localisée à n'importe quel moment de son mouvement ; l'autre solution n'a pas de caractère corpusculaire, car elle reflète entièrement les propriétés ondulatoires. Ici, les auteurs de ce schéma par-

14. *Physical Review*, 1952, t. 85, 16, 180.

lent de la « théorie du guidage » et de la notion d' « onde pilote ». En bref, J.-P. Vigier définit ainsi l'essentiel de la théorie de la double solution : elle ... « considère cet aspect particulaire comme une région singulière dans une onde physique étendue réelle »[15].

L. de Broglie définit cette région « comme une sorte d'accident local dans la structure de l'onde »[16]. Il considère qu'il est indispensable, au moyen d'une telle solution, « de rétablir... la conception d'une localisation du corpuscule dans l'espace », ce qui serait un pas important dans la solution des contradictions de la mécanique quantique (pp. 9-10) ; en parlant d'un « corpuscule strictement localisé », il l'identifie à une région extrêmement petite du processus ondulatoire continu, où l'intensité du champ a une valeur extrêmement grande (p. 8). De plus, il croit possible dans ce cas de parler de la trajectoire que suivront les particules et que le « théorème du guidage » définit entièrement; enfin il considère que « la théorie de la double solution conduit ainsi à des schémas statistiques d'un type tout à fait classique » (p. 10).

Les auteurs de la conception de la double solution estiment que tout cela offre « des perspectives très intéressantes » ; ils croient qu'elle permettra « d'aboutir à une description *complète* des individus physiques » et « d'opérer une jonction entre la Physique quantique et la Relativité générale » (L. de Broglie). Quant à J.-P. Vigier, il estime que cette conception résout presque toutes les contradictions existant, à son avis, dans la mécanique quantique, entre la discontinuité et la continuité, le hasard et la causalité, le sujet et l'objet (en rapport avec le rôle de l'appareil).

Indiscutablement, cette conception poursuit un but important, celui de donner une solution des problèmes de la mécanique quantique en se servant des principes du matérialisme dialectique. Plusieurs thèses des auteurs présentent un intérêt certain, sans parler de la signification du fait même qu'ils s'efforcent de résoudre ces problèmes en partant du point de vue de la philosophie dialectique matérialiste. Mais, en même temps, il est impossible de ne pas remarquer dans la conception de ces savants des insuffisances sérieuses, précisément au point de vue de la théorie de la connaissance du matérialisme dialectique.

15. *La Pensée*, 1955, 64, p. 24.
16. *Atomes*, 1956, 118, p. 7.

Avant tout nous considérons comme inexacte et ne correspondant pas à l'état réel des choses la tentative de représenter la mécanique quantique existante, avec son contenu physique et son appareil mathématique, comme un système possédant des contradictions internes et des défauts sérieux. La mécanique quantique est, dans le domaine qu'elle étudie, un instrument aussi parfait dans les mains de l'homme que la mécanique macroscopique dans son domaine. La nouveauté des phénomènes étudiés, le caractère spécifique et inhabituel (au point de vue de notre pratique macroscopique) des lois des phénomènes microscopiques, les relations réciproques entre la micro et la macro-mécanique, le caractère dialectique plus profond des processus atomiques et intra-atomiques, tout cela suscite naturellement des difficultés lorsqu'on prend connaissance de la physique atomique moderne, tout cela nécessite de grands efforts pour prendre conscience de toute sa profondeur et sa complexité.

Une difficulté véritable, à notre avis, est la question de la détermination précise de l'ensemble des phénomènes atomiques qu'étudie la mécanique quantique, la question de l'indication exacte des liaisons et des rapports de causalité matériels qui sont déterminants pour l'ensemble des phénomènes en question, et de ceux qui n'ont qu'un caractère contingent, probabiliste. Il est clair que, pour répondre à ces questions de grande importance, il est indispensable de tenir entièrement compte de tout ce que nous fournit le progrès de la science physique et, en premier lieu, de la théorie des champs matériels quantifiés. C'est en prenant en considération ces conceptions physiques plus profondes de la nature du dualisme ondes-corpuscules, des rapports du champ et des particules, des corpuscules en tant qu'excitations élémentaires quantifiées de vides matériels, de la transmission de l'interaction par les champs quantifiés, etc., que nous pourrons connaître de façon plus approfondie la structure interne de la matière.

Les constructions physiques concrètes de D. Bohm, L. de Broglie, J.-P. Vigier, etc., manquent de conséquence, d'abord parce que ces auteurs considèrent toutes les lois *statistiques*, y compris les lois de la mécanique quantique, non comme des lois objectives de la nature comprenant l'aspect dynamique comme un de leurs éléments, mais comme le résultat de notre ignorance. Ce faisant, ils considèrent, et c'est là leur erreur principale, que notre ignorance se ramène à celle de certaines particules submicroscopiques avec des paramètres quasi-classiques, qui se manifestent dans les phénomènes étudiés par la mécanique

quantique sous la même forme que les heurts des molécules du fluide dans le mouvement brownien.

Nous considérons de même dans une certaine mesure comme mécaniste le fondement philosophique de la théorie de la double solution. Ce n'est qu'une tentative plus complexe de revenir aux représentations corpusculaires et ondulatoires *classiques*, déterminées au sens de Laplace, et négligeant par là même le caractère inépuisable des liaisons et des rapports dans le monde matériel réel.

Mais la pratique du développement de la microphysique réfute par tout son contenu les tentatives d'expliquer de façon mécaniste les lois de la nature. Il est déjà tout à fait clair que les questions de localisation spatio-temporelle, lors des processus de naissance, d'absorption et de collision des excitations élémentaires des champs quantifiés, ne peuvent pas être résolues dans le cadre des conceptions mécanistes. Evidemment, le seul examen philosophique de ces questions ne pourra pas remplacer le développement ultérieur des théories physiques. Mais en tout cas le contenu du matérialisme dialectique montre que le développement des lois statistiques objectives de la théorie quantique actuelle doit progresser en s'éloignant encore plus des lois approchées de la *macrophysique*. Ce mouvement vers l'avant est lié au labeur plein d'abnégation de l'énorme collectivité des physiciens expérimentateurs et théoriciens qui surmontent avec persévérance les difficultés considérables qu'ils rencontrent aux avant-postes du front scientifique. C'est ici que prend toute son importance la nécessité de faire triompher d'une façon conséquente précisément le point de vue matérialiste *dialectique* qui nous garantit une voie juste vers la solution des problèmes les plus importants de la science actuelle.

S. VONSOVSKI et G. KOURSANOV.

О связи динамических и статистических закономерностей . атомных явлениях. Вестник Академии Наук СССР. (*Courrier de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*), 1957, 4, pp. 32-45.

Traduction française par les soins des auteurs.

SUR L'ESSENCE DE LA THEORIE DE LA RELATIVITE

1. Introduction

La théorie de la relativité, qui fit son apparition il y a bientôt cinquante ans, a modifié radicalement un grand nombre de concepts de la physique que l'on croyait immuables, et avant tout les concepts d'espace et de temps. En bref, elle consiste essentiellement en une théorie physique de l'espace et du temps, correspondant au niveau actuel de nos connaissances sur les lois qui régissent les propriétés et les relations spatiales et temporelles des objets et des phénomènes. Comme tout phénomène se déroule dans l'espace et dans le temps, les lois générales établies par la théorie de la relativité s'appliquent aux catégories de phénomènes les plus variées. Il est donc compréhensible que la théorie de la relativité soit l'une des plus importantes de la physique contemporaine et que ses conséquences s'étendent aux domaines les plus variés des sciences physiques, depuis le calcul des accélérateurs de particules jusqu'aux problèmes de la cosmologie. Il est également compréhensible par conséquent que les résultats généraux de la théorie de la relativité possèdent une portée philosophique, puisqu'ils touchent aux concepts généraux d'espace et de temps, de mouvement, de masse, d'énergie, etc.

Cependant, le remaniement profond de ces concepts fut mal compris, dès le début, par la plupart des physiciens et en particulier par Einstein, principal fondateur de la théorie de la relativité. Ne possédant pas les notions du matérialisme dialectique, qui seul permet une véritable compréhension de la théorie de la relativité, les physiciens bourgeois interprétaient et interprètent encore les fondements et les résultats de cette théorie d'une manière idéaliste, dénaturent et embrouillent la compréhension de son contenu objectif. Ils

aboutissent à la négation des lois objectives de la physique, qu'ils déclarent être des conventions arbitraires, et à la négation de la matière : les objets et les phénomènes seraient des complexes de sensations, et les lois de l'espace et du temps, des formes subjectives d'organisation de nos sensations. Cette position, qui se rattache ouvertement à l'idéalisme subjectif, fut défendue en particulier par Einstein [1]. Les tendances idéalistes en physique furent démontées et soumises à une critique radicale par Lénine. Non seulement le matérialisme dialectique réfute l'idéalisme, mais encore il donne tous les éléments nécessaires pour une véritable compréhension des données de la science et en particulier de la théorie de la relativité. Ainsi, les thèses développées par Staline sur les liens de dépendance réciproque des phénomènes, sur le caractère objectif des lois de la science, sur l'abstraction scientifique, sont d'une très grande importance pour la compréhension de la théorie de la relativité.

Cependant, des points de vue profondément erronés, idéalistes et métaphysiques sur la théorie de la relativité sont parfois exprimés aujourd'hui encore, dans notre littérature. Ces points de vue se rencontrent même dans des articles dont les auteurs s'efforcent de parler au nom du matérialisme dialectique et de s'appuyer sur lui. Le brouillard ne s'est pas encore dissipé autour de la théorie de la relativité, les erreurs idéalistes sont répétées à qui mieux mieux et certains proposent même de rejeter la théorie de la relativité, refusant ainsi ses conclusions objectives et fondées.

Il ne nous a donc pas paru superflu de tenter, dans le prése[nt] article, d'examiner cette question : quelle est l'essence objective [de] la théorie de la relativité ?

Nous nous proposons de mettre en évidence le contenu object[if] de la théorie et d'exposer sa signification véritable, une fois affran[chie] des altérations introduites par la forme idéaliste que l'idéolog[ie] bourgeoise lui avait donnée. Les physiciens idéalistes, à commenc[er] par Einstein, ont altéré le sens de la théorie à un point tel qu'il [est] difficile d'en trouver aujourd'hui un exposé développé qui s[oit] affranchi de l'influence de l'idéalisme. L'essentiel est de mettre [en] lumière le sens objectif et le contenu de la théorie. En ce qui co[n]cerne la critique des déformations, nous ne pourrons lui accor[der] qu'une place relativement réduite; nous porterons surtout notre att[en-]

1. Voir par exemple A. Einstein : *Les fondements de la théorie de [la] relativité.*

tion sur quelques erreurs grossières apparues dans des travaux récents.

La théorie de la relativité comprend deux stades : la théorie de la relativité restreinte et la théorie de la relativité généralisée. Nous nous limiterons au premier, dans cet article, et nous le désignerons simplement par « théorie de la relativité », comme on le fait habituellement. Les problèmes de la théorie de la relativité généralisée seront abordés dans un autre article.

Nous tenterons ici de définir dans leurs grandes lignes l'essence et les principaux traits de la théorie de la relativité, sans entrer dans l'analyse détaillée de ses concepts. Cette analyse sera donnée dans un prochain article, en même temps qu'une étude des catégories de relatif et d'absolu, de relation et de propriété, etc., dans la mesure où celles-ci sont liées aux problèmes de la théorie de la relativité.

Je remercie S. V. Vallander pour ses importantes observations, qui m'ont permis d'améliorer l'exposé de la structure de la théorie de la relativité.

2. Caractère général de la théorie de la relativité

La théorie de la relativité est donc essentiellement une théorie de l'espace et du temps ou, en d'autres termes, une théorie générale des propriétés et des relations spatiales et temporelles des objets et des phénomènes. Objectivement, et contrairement au point de vue subjectif d'Einstein et d'autres physiciens, elle part du fait que l'espace et le temps sont des formes d'existence de la matière et que par conséquent les relations spatiales et temporelles n'ont pas d'existence propre, ne sont pas définies en elles-mêmes, mais sont déterminées par les rapports matériels des objets et des phénomènes. Le fondement de la théorie de la relativité fut l'étude des processus électromagnétiques, de sorte que la théorie de la relativité est effectivement née de l'étude de formes concrètes de mouvement de la matière et de formes concrètes d'interaction.

En formulant les lois générales des relations spatiales et temporelles, la théorie de la relativité s'appuie sur les résultats de l'étude de formes concrètes du mouvement de la matière et, d'autre part, s'écarte nécessairement du particulier et du concret pour mettre

l'accent sur ce qui est objectivement général dans les relations concrètes entre les objets et les phénomènes. Sans cela, elle ne pourrait être une théorie générale des propriétés et des rapports spatiaux et temporels, elle ne pourrait constituer une théorie de l'espace et du temps comme formes générales d'existence de la matière et elle resterait la théorie de telle ou telle forme concrète du mouvement de la matière. Sous ce rapport, la théorie de la relativité est nécessairement analogue à la géométrie, qui, étant une théorie générale des formes et des relations spatiales, « énonce ses lois en faisant abstraction des objets concrets, en considérant ceux-ci comme des corps dépourvus de caractère concret et en définissant les rapports entre eux, non point comme des rapports concrets entre tels ou tels objets concrets, mais comme des rapports entre les corps en général, dépourvus de tout caractère concret » [2].

Exactement de la même manière, la théorie de la relativité formule ses lois en faisant abstraction des objets et des phénomènes concrets, en considérant ceux-ci comme des corps et des événements en général et en définissant les rapports entre eux, non point comme des rapports concrets entre tels ou tels objets et phénomènes concrets, mais comme des rapports entre les corps et les événements en général, en faisant abstraction de leur nature concrète. Cette similitude entre la théorie de la relativité et la géométrie est déterminée par leur contenu même, puisque la géométrie est une théorie générale des formes et des relations spatiales, tandis que la théorie de la relativité est une théorie générale des propriétés et des relations spatiales et temporelles. De même que la géométrie, née de l'étude expérimentale des formes concrètes et des rapports entre objets concrets, s'éloigne ensuite du particulier et du concret, de même la théorie de la relativité, née de l'observation de phénomènes concrets et de l'étude des lois des formes concrètes du mouvement, s'éloigne du particulier et du concret et formule les lois générales des rapports spatiaux et temporels entre les objets et les phénomènes [3].

---

2. J. Staline : *A propos du marxisme en linguistique*, in *Derniers écrits*, Editions Sociales 1953, p. 31.

3. En comparant la théorie de la relativité et la géométrie, il ne faut pas oublier la distinction entre théorie physique et théorie mathématique. Si la théorie physique générale, tout en s'éloignant du particulier et du concret, tient compte du contenu matériel des formes et des relations spatiales ainsi que des conditions d'applicabilité des concepts et des abstractions, la théorie mathématique laisse entièrement le contenu matériel de côté comme une chose indifférente.

Quand nous disons que la théorie de la relativité est une théorie ;énérale des propriétés et des relations spatiales et temporelles, cela ignifie précisément qu'elle distingue ce qui est objectivement généal dans ces propriétés et ces relations et qu'elle formule des lois valables dans les circonstances concrètes les plus variées. Mais cela ie signifie nullement que ses lois et ses résultats ont un caractère iniversel et sont rigoureusement vérifiés en tous temps et en toutes :irconstances. La théorie de la relativité ne possède qu'une signiication limitée; comme les hypothèses sur lesquelles elle est fondée, ses résultats ne sont pas parfaitement exacts, mais sont applicables ivec une précision suffisante seulement à l'intérieur d'un certain :adre, dans certaines conditions.

En résumé, la théorie de la relativité représente une vérité relaive, quoiqu'elle contienne une part essentielle de vérité absolue. Il convient de garder constamment présent à l'esprit ce fait, qui ne sera plus mentionné jusqu'au dernier paragraphe de cet article, où nous examinerons particulièrement la question des limites de la théorie de la relativité.

3. Base et particularité principale de la théorie de relativité.

L'ancienne théorie de l'espace et du temps se fondait avant tout sur les lois du mouvement des corps solides et s'exprimait dans la géométrie euclidienne et dans la cinématique « classique ». Les concepts fondamentaux étaient l'espace euclidien (jusqu'à Lobatchevski, on n'imaginait pas qu'il pût exister d'autres formes d'espaces) et le temps absolu, qui s'écoule uniformément en toutes circonstances, indépendamment de quoi que ce soit.

L'étude des processus électromagnétiques, en particulier dans les corps en mouvement, mena à des conclusions en contradiction avec la théorie ancienne et surtout avec l'idée de temps absolu. Les essais faits pour surmonter cette contradiction donnèrent naissance à la théorie de la relativité [4], qui rejetait le concept de temps absolu

4. Il est bon de rappeler que le premier travail d'Einstein, qui jeta les bases de la théorie de la relativité, avait pour titre *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement.*

comme ne correspondant pas dans une mesure suffisante à la réalité. (Par ailleurs, la théorie de la relativité restreinte conservait l'idée que l'espace obéit exactement aux règles de la géométrie euclidienne; la théorie de la relativité généralisée rejeta cette conception).

Le résultat essentiel de l'étude des processus électromagnétiques, entrant en contradiction avec la théorie classique de l'espace et du temps et, parallèlement, servant de principal fondement à la théorie de la relativité, est la loi de la constance de la vitesse de la lumière. (Quoiqu'il ne soit question que de la vitesse de la lumière dans l'énoncé de cette loi, elle s'applique en fait plus généralement à la vitesse de propagation des « perturbations » électromagnétiques; la lumière est un cas particulier de ces perturbations. Cependant, nous nous conformerons à l'usage et parlerons seulement de la lumière).

La loi de la constance de la vitesse de la lumière sous sa forme générale peut être formulée ainsi : *dans le vide, la lumière se propage dans toutes les directions, quelle que soit sa source, avec une vitesse constante par rapport à un corps quelconque se mouvant par inertie* [5]. Les processus électromagnétiques se propagent dans tout l'espace et on peut dire qu'il n'existe pas d'endroit où ils ne se produisent pas; leur vitesse de propagation étant toujours la même, il s'agit donc de l'existence d'une vitesse qui possède une signification universelle.

Mais une vitesse est le rapport d'une longueur à un temps ; l'existence d'une vitesse universelle entraîne donc l'existence d'un lien universel entre les grandeurs d'espace et de temps. Tout mouvement (au sens de déplacement) établit un lien concret particulier entre l'espace et le temps : on peut associer à chaque instant précis la position correspondante du corps en mouvement. Mais l'existence d'une vitesse qui est une constante universelle entraîne l'existence d'u

5. Pour ceux qui pourraient avoir des doutes sur le sens du m « vide », précisons qu'il s'agit en réalité non du vide absolu, puisque champ électromagnétique est lui-même une forme de la matière, ma d'un vide relatif, c'est-à-dire d'une raréfaction suffisante de la matiè (au sens restreint). La loi de la constance de la vitesse de la lumière e souvent formulée comme la loi de l'indépendance de la vitesse de lumière par rapport au mouvement de la source, en supposant que cette loi et du principe de relativité découle la loi de la constance de vitesse de la lumière sous sa forme générale. Cependant cela est inexa à strictement parler. Nous examinerons dans un autre article les relatio qui existent entre les différentes formulations de la loi de la constan de la vitesse de la lumière et le principe de relativité.

lien universel entre les grandeurs d'espace et de temps et l'existence d'un rapport entre l'espace et le temps eux-mêmes.

La particularité principale, l'essence de la théorie de la relativité réside dans l'établissement de ce lien entre l'espace et le temps, L'espace et le temps s'unissent en une forme générale d'existence de la matière : l'espace-temps. Mais cela ne signifie nullement que « l'espace en soi et le temps en soi doivent se retirer dans l'empire des ombres », comme le proclamait Minkovski. Cela signifie seulement que la distinction entre l'espace en soi et le temps en soi, entre les rapports spatiaux et les rapports temporels considérés isolément, n'a pas de signification absolue. C'est justement pour cela que disparaît le concept du temps absolu qui s'écoule partout uniformément, indépendamment de quoi que ce soit.

La théorie de la relativité exprime le lien entre l'espace et le temps sous la forme d'une loi générale, rigoureusement formulée, qui relie les grandeurs d'espace et de temps. C'est précisément cette loi fondamentale, et les conséquences qui en découlent pour les rapports spatiaux et temporels, qui forment son contenu en tant que théorie de ces rapports. D'autre part la théorie de la relativité fournit une méthode générale permettant de déterminer les effets de cette loi fondamentale sur les lois des différents phénomènes physiques, sur les lois de telle ou telle forme de mouvement de la matière.

Par conséquent, notre tâche consiste, en premier lieu, à formuler la loi fondamentale de la théorie de la relativité et à mettre en évidence son contenu essentiel et, en second lieu, à définir la méthode de la théorie de la relativité.

4. Systèmes de référence et coordonnées.

L'espace et le temps sont des formes d'existence de la matière, ce qui signifie en particulier que les rapports d'espace et de temps ne sont pas définis et n'existent pas en eux-mêmes à l'état pur, mais sont déterminés par les liens matériels entre les objets et les phénomènes, comme la forme est déterminée par le contenu. Si l'on imagine un phénomène entièrement isolé, absolument indépendant de tout autre phénomène, alors la question de l'instant et du lieu de ce phénomène perd toute signification, puisque l'absence

d'une liaison quelconque exclut toute base matérielle objective pour la réponse.

En raison de la liaison et de l'interaction universelles, chaque corps donné et les processus dont il est le siège sont liés d'une manière ou d'une autre à tous les autres corps et processus. Ces liaisons matérielles définissent la coordination des corps et des événements dans l'espace et dans le temps par rapport à un corps déterminé quelconque et aux processus qui s'y déroulent. Ainsi, ce corps déterminé joue le rôle de « corps de référence », et la coordination des événements à l'aide de ce corps constitue un « système de référence ».

Dans la théorie de la relativité on peut partir du fait que les événements dans un objet quelconque B peuvent être situés dans le temps relativement aux événements dans un objet donné A, grâce à l'interaction par l'intermédiaire de champs électromagnétiques, ou en d'autres termes, au moyen de signaux lumineux qui possèdent justement une vitesse de propagation constante [6].

Faisant maintenant abstraction du contenu matériel des rapports de temps et d'espace pour les considérer seulement à l'état pur, nous arrivons à la conclusion que la coordination des événements dans un système de référence se ramène à attribuer à chaque événement des cooordonnées d'espace x, y, z et une coordonnée de temps t. En bref, on définit dans le système de référence les coordonnées d'espace et de temps x, y, z, t.

D'une façon entièrement analogue, un système de coordonnées spatiales s'appuie sur tel ou tel corps et donne la coordination des points par leurs rapports avec ce corps. Les coordonnées rectangulaires x, y, z sont habituellement définies par les distances des

---

6. Soit t le temps défini par le déroulement des processus dans le corps A, c'est-à-dire son « temps propre ». Supposons que la lumière émise par A à l'instant t_1 revient en A, après réflexion sur le corps B à l'instant t_2. Alors, la réflexion de la lumière sur B est simultanée avec un événement se produisant en A à mi-temps entre l'émission et le retour du signal, c'est-à-dire à l'instant $1/2\ (t_1 + t_2)$. On définit ainsi la simultanéité (relativement au corps A) des événements dans les corps A et B ; et par là même, plus généralement, la coordination dans le temps des événements dans le corps B relativement au corps A. Cette définition de la simultanéité, donnée par Einstein, sera analysée plus en détail dans un prochain article. La difficulté vient de ce que cette définition repose sur la constance de la vitesse de la lumière, alors que la définition du concept même de vitesse implique déjà la notion de temps en des points différents de l'espace. Ce cercle vicieux apparent a provoqué de sérieux malentendus et des erreurs idéalistes. En réalité, il n'y a pas de cercle vicieux et notre tâche consistera à éclaircir ce point.

points à trois plans, qui seront par exemple deux murs et le plancher d'une pièce. Exactement de la même manière, les coordonnées géographiques — latitude et longitude — sont liées à la Terre et définissent la position d'un point par rapport aux pôles et au méridien origine (par exemple le méridien de Poulkovo).

Le système de coordonnées x, y, z, t est une expression abstraite de la coordination objective des corps et des phénomènes dans l'espace et dans le temps.

Dans la théorie classique, la coordination des phénomènes dans le temps dans un système de référence donné ne jouait aucun rôle, car on pensait que le temps s'écoulait partout uniformément, indépendamment de quoi que ce soit. Mais pour la théorie de la relativité, qui nie ce temps absolu, il est essentiel de rapporter les temps des événements à un système déterminé. Quand on passe d'un système à un autre, les coordonnées d'espace et de temps des événements se modifient et la liaison générale entre l'espace et le temps se manifeste.

Un système de référence est dit système d'inertie si « la loi de l'inertie est vérifiée dans ce système », c'est-à-dire si tout corps qui n'est soumis à aucune action notable, donc qui se meut par inertie, est soit immobile, soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme par rapport à ce système. Un système de référence lié à un corps qui se meut par inertie est précisément un système d'inertie.

La théorie de la relativité, comme la mécanique classique, se préoccupe avant tout des systèmes d'inertie. La loi de la constance de la vitesse de la lumière concerne ces systèmes et affirme que la vitesse de la lumière est la même dans tous les systèmes d'inertie.

5. La loi de la liaison mutuelle de l'espace et du temps

La loi de la constance de la vitesse de la lumière, exprimée au moyen des coordonnées, conduit à la formulation mathématiquement rigoureuse de la loi fondamentale de la théorie de la relativité.

La distance entre deux points A et A_0, de coordonnées rectangulaires x, y, z, et x_0, y_0, z_0, est exprimée par la formule connue :

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}.$$

Soit c la vitesse de la lumière; soit t_0 l'instant où un signal lumineux est émis par le point A_0, et soit t l'instant où ce signal atteint le point A. La distance r parcourue par la lumière est égale à $c\,(t - t_0)$. La loi de propagation de la lumière s'exprime donc par la formule :

$$\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2} = c\,(t-t_0). \qquad (A)$$

Conformément à la loi de la constance de la vitesse de la lumière, cette formule est valable dans tous les systèmes d'inertie; autrement dit, lorsque l'on passe des coordonnées x, y, z, t d'un système aux coordonnées x', y', z', t' d'un autre système, elle doit conserver la même forme.

Comme des signaux électromagnétiques sont constamment transmis d'un lieu quelconque à un autre, on peut choisir arbitrairement dans cette formule les coordonnées et l'instant initial t_0; et comme la formule est vraie pour tout système d'inertie, elle traduit directement un lien réciproque universel entre les coordonnées d'espace et de temps, c'est-à-dire un lien universel entre les grandeurs et les relations spatiales et temporelles, un lien entre l'espace et le temps.

Ainsi, *cette formule, et le fait qu'elle est invariable, représentent la loi fondamentale de la théorie de la relativité : la loi de la corrélation de l'espace et du temps.*

En se fondant sur l'invariabilité de cette formule, on peut en effet obtenir par des considérations purement mathématiques l'expression des coordonnées dans un système en fonction des coordonnées dans un autre système; dans cette expression s'introduit la vitesse de l'un des systèmes par rapport à l'autre. Ce sont les formules classiques de la transformation de Lorentz, accompagnée d'un changement d'échelle pour les coordonnées x, y, z, t [7].

7. Plus exactement, on peut démontrer le théorème suivant : toute transformation qui fait passer des variables x, y, z, t aux variables x', y', z', t' en conservant la forme de la relation $\sqrt{(x-x_0)^2+\ldots} = c(t-t_0)$ est une combinaison des transformations suivantes : 1) la transformation de Lorentz, sous la forme simple qu'on lui donne habituellement :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$$

Un tel changement d'échelle se traduit mathématiquement par la multiplication de toutes les coordonnées : x, y, z, t, par un même facteur. La formule (A) conserve évidemment sa forme (bien entendu, x_0, y_0, z_0, t_0 se transforment de la même manière que x, y, z, t), de sorte que le changement d'échelle est permis. Cependant on peut l'éliminer en fixant une unité de mesure commune à tous les systèmes et, comme le choix de l'échelle n'a pas de signification fondamentale, il est naturel de la considérer comme fixe et d'éliminer le changement d'échelle de la transformation de Lorentz.

Dans le cas où l'un des systèmes est animé relativement à l'autre d'une vitesse v parallèle à l'axe x, la transformation de Lorentz pour le temps prend la forme connue :

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (B)$$

Cette relation signifie que l'instant t' d'un événement relativement à l'un des systèmes, non seulement n'est pas égal à l'instant t de ce même événement relativement à l'autre système, mais dépend également de la coordonnée x, c'est-à-dire de l'endroit où l'événement s'est produit dans l'espace. Deux conséquences immédiates en découlent : premièrement, le lien entre le temps et l'espace est ici clairement mis en évidence; deuxièmement, les événements qui sont simultanés par rapport à l'un des systèmes ne sont pas simultanés par rapport à l'autre système, si leurs coordonnées x sont différentes.

Comme on sait, la formule (B) a pour conséquence directe que

---

2) un changement d'origine des coordonnées x, y, z, une rotation et au besoin un changement d'orientation des axes x, y, z (c'est-à-dire une transformation orthogonale des variables x, y, z); 3) un changement d'origine pour la coordonnée de temps t; 4) un changement d'échelle pour x, y, z, t, c'est-à-dire la multiplication de ces quatre variables par un même nombre. La démonstration mathématique rigoureuse de ce théorème sera donnée dans l'article de l'auteur et V.V. Ovtchinnikova qui paraîtra dans le prochain numéro de la revue (de l'Université de Léningrad). Le changement d'échelle est toujours exclu dans la transformation de Lorentz. Mais cela n'est pas tout à fait correct : l'expression des lois est aussi invariable par rapport à un changement d'échelle pour x, y, z, t; par conséquent, le principe de relativité exprime l'invariabilité des lois par rapport à une transformation de Lorentz généralisée, accompagnée d'un changement d'échelle.

l'intervalle de temps entre deux événements, par exemple le début et la fin d'un processus quelconque, est différent dans des systèmes de référence différents. Supposons que, par rapport à un certain système, deux événements A_1 et A_2 se produisent aux instants t_1 et t_2, au même endroit, de sorte que $x_1 = x_2$. La différence $t_1 - t_2 = \Delta t$ mesure l'intervalle de temps entre ces événements relativement au système donné. La formule (*B*) donne :

$$t_1' - t_2' = \Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

c'est-à-dire que l'intervalle de temps entre les deux événements est différent dans le second système. Ainsi apparaissent clairement dans la transformation de Lorentz la liaison mutuelle de l'espace et du temps, de même que la relativité du temps, l'absence de temps absolu qui découlent de cette liaison.

D'une manière tout à fait analogue, on déduit de la transformation de Lorentz, par un procédé classique, la relativité des longueurs ou des distances spatiales entre deux événements, la nouvelle loi d'addition des vitesses et plus généralement toute la cinématique relativiste.

Ainsi, la loi fondamentale de la théorie de la relativité — la loi de la corrélation de l'espace et du temps —, avec toutes ses conséquences pour les relations spatiales et temporelles [8], peut s'exprimer sous les deux formes suivantes, qui sont équivalentes.

Les grandeurs d'espace et de temps sont liées de telle manière que, lorsque l'on passe d'un système d'inertie à un autre, le rapport de ces grandeurs qui intervient dans la loi de la propagation de la lumière reste constant; ou bien, en abandonnant la propagation de la lumière et en ne conservant que les relations d'espace et de temps sous leur forme pure, *le lien entre les grandeurs d'espace et de temps traduit par la formule* (*A*) *se conserve lorsque l'on passe d'un système à un autre.*

8. Il convient peut-être de faire la remarque évidente que le mouvement, en tant que déplacement d'un objet relativement à un autre objet est également une relation spatio-temporelle. La cinématique étudie donc des relations spatio-temporelles.

Comme on peut déduire de l'invariabilité de la formule (A) les équations de la transformation de Lorentz et comme, réciproquement, une telle transformation laisse cette formule invariable, l'énoncé suivant est encore équivalent : *les coordonnées d'espace et de temps dans des systèmes d'inertie différents sont liées par la transformation de Lorentz.*

Le lien entre l'espace et le temps se manifeste dans le mouvement; il est donc compréhensible que ce lien apparaisse sous sa forme générale précisément dans les relations entre les coordonnées dans deux systèmes en mouvement relatif, dans le passage d'un système à l'autre. Dans un système donné, le temps est défini de façon univoque et, par conséquent, séparé de l'espace.

6. La méthode de la théorie de la relativité : le principe de relativité.

On considère généralement que la première loi fondamentale de la théorie de la relativité est le principe de relativité, qui, sous sa forme générale, affirme que « *tous les systèmes d'inertie sont équivalents en principe* », *c'est-à-dire que les lois qui régissent le déroulement des phénomènes physiques sont les mêmes dans tous les systèmes d'inertie.*

Le lecteur a sans doute remarqué avec étonnement que, contrairement à l'opinion courante, non seulement nous n'avons pas donné ce principe comme loi fondamentale de la théorie de la relativité, mais nous ne l'avons pas mentionné du tout. Il y a deux raisons à cela.

En premier lieu, comme nous l'avons déjà dit, le contenu de la théorie de la relativité, en tant que théorie des relations spatio-temporelles à l'état pur, est entièrement défini en toute rigueur mathématique par la loi de la liaison mutuelle de l'espace et du temps, et celle-ci découle avec la même rigueur de la loi de la constance de la vitesse de la lumière. Il n'est donc aucunement nécessaire de recourir au principe de relativité. Certes, la loi de la constance de la vitesse de la lumière contient l'affirmation que tous les systèmes d'inertie sont égaux par rapport à cette loi, ce qui est en parfait

accord avec le principe de relativité [9]; mais le principe de relativité sous sa forme générale n'est absolument pas nécessaire ici.

En second lieu, le principe de relativité n'est nullement un trait spécifique de la théorie de la relativité. Il était connu en mécanique classique et peut être formulé mot pour mot de la même façon dans ce domaine. C'est-à-dire que les lois de la mécanique classique sont les mêmes dans tous les systèmes d'inertie et, suivant l'opinion ancienne d'après laquelle tous les phénomènes se ramènent à des phénomènes mécaniques, ce principe de relativité mécanique peut être considéré comme une loi générale.

La théorie de la relativité emprunta le principe de relativité à la mécanique classique; mais, refusant de ramener tous les phénomènes à des phénomènes mécaniques, elle étendit le principe de relativité non seulement aux processus mécaniques, mais également et avant tout aux processus électromagnétiques et elle considéra ce principe comme une loi générale. Mais surtout, elle lia ce principe à la loi de la constance de la vitesse de la lumière et donc à la loi fondamentale de la liaison mutuelle de l'espace et du temps, et elle lui donna une forme nouvelle correspondant à cette loi.

Ainsi, c'est la loi de la liaison mutuelle de l'espace et du temps qui constitue la loi fondamentale de la théorie de la relativité, parce qu'elle détermine son contenu fondamental et les caractères spécifiques qui la distinguent des théories antérieures. Quant au principe de relativité, il joue en réalité le rôle de *méthode* fondamentale de la théorie de la relativité, et c'est de ce point de vue que nous l'examinerons.

La validité du principe de relativité en mécanique et en électrodynamique est confirmée par des recherches expérimentales spéciales et par la pratique technique. Si on veut l'appliquer à un domaine nouveau, il reste hypothétique tant qu'il n'a pas reçu de preuve expérimentale. En résumé, le principe de relativité est une loi objective, mais, comme une loi ordinaire de la physique, il n'a qu'une signification limitée et doit être vérifié par la pratique.

Puisque tout phénomène se déroule dans l'espace et dans le temps, la loi générale de liaison mutuelle de ceux-ci, établie par la

9. Certes, la loi de la constance de la vitesse de la lumière dans tou les systèmes d'inertie découle de cette loi pour un système particulie et du principe de relativité. Ce principe s'introduit donc ici tout au plu sous cette forme particulière : par rapport à la loi de la propagation d la lumière.

héorie de la relativité, doit influer sur les lois qui régissent les différents phénomènes et se manifester dans les différentes lois de la physique. Par exemple, puisque les grandeurs d'espace et de temps figurent dans les lois de la mécanique, il est évident que les lois générales de liaison mutuelle entre ces grandeurs doivent influer sur es lois de la mécanique.

Une loi physique quelconque représente un certain lien général et nécessaire entre les aspects ou les caractéristiques de tel ou el type de phénomène. Elle s'exprime habituellement sous la forme d'une relation fonctionnelle entre les grandeurs physiques correspondantes.

Cependant, une caractéristique déterminée d'un phénomène, une grandeur déterminée, peut se manifester différemment par rapport à des systèmes de références différents. Elle est, en ce sens, relative, étant bien entendu que cette relativité est objective et ne consiste nullement en une dépendance de quoi que ce soit par rapport au « point de vue de l'observateur », etc. Ainsi, les coordonnées x, y, z, t d'un événement sont relatives parce qu'elles expriment la relation objective entre l'événement et le corps de référence. D'autres grandeurs liées à ces coordonnées sont, comme elles, relatives, par exemple la durée Δt d'un processus arbitraire, la vitesse $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, etc. Sont également relatives la quantité de mouvement et l'énergie cinétique d'un corps, etc. Dans tous les cas, il s'agit des caractéristiques *objectives* des objets et des phénomènes, exprimées par leurs *relations* avec d'autres objets et phénomènes (corps de référence).

Le principe de relativité affirme que bien que les caractéristiques d'un phénomène, liées par une loi, puissent être relatives et se manifester différemment dans des systèmes d'inertie différents, le lien lui-même, se traduisant par la loi pour les phénomènes du type considéré, est non-relatif, est identique dans tous les systèmes d'inertie. Ce lien est inhérent au type donné de phénomènes, comme sa propriété absolue. Si une loi s'exprime par un lien fonctionnel entre des grandeurs physiques, le principe de relativité affirme que ce lien fonctionnel ne peut se modifier quand les grandeurs sont rapportées à des systèmes d'inertie différents. Par exemple, la quantité de mouvement est relative, mais la loi de la conservation de la quantité de mouvement est absolue; en particulier, la somme des quantités de mouvement de deux objets est la même avant et

après un choc, indépendamment du système auquel on rapporte le mouvement des objets. Cet exemple est d'ailleurs valable aussi bien en mécanique classique qu'en mécanique relativiste [10].

Etant donné qu'une loi concerne les liens entre le déroulement d'un phénomène de tel ou tel type et les conditions qui déterminent ce phénomène, le principe de relativité affirme : *si pour deux phénomènes d'un même type, rapportés à deux systèmes d'inertie, des conditions identiques se trouvent reproduites, le déroulement des phénomènes sera identique dans les deux systèmes.*

Par rapport à un système concret unique, l'aspect général des lois de certains phénomènes peut ne pas se dévoiler entièrement : il se dévoile seulement quand des phénomènes d'un type donné apparaissent sous des rapports différents, relativement à des systèmes différents. Il est donc compréhensible que la répercussion des lois générales de l'espace et du temps et de la liaison mutuelle entre eux sur les lois des phénomènes physiques se manifeste quand on passe d'un système de référence à un autre. La signification de l'invariabilité de la forme des lois physiques quand on passe d'un système d'inertie à un autre, qui résulte du principe de relativité, réside en ceci qu'elle met en lumière les répercussions des lois générales de l'espace-temps sur les diverses lois de la physique.

L'invariabilité des expressions des lois physiques quand on passe d'un système à un autre, exigée par le principe de relativité, impose à ces expressions des conditions déterminées. En bref, et d'un point de vue formel, l'expression des lois physiques doit être invariable dans la transformation de Lorentz, puisque le passage des coordonnées d'un système aux coordonnées d'un autre système s'effectue précisément au moyen de cette transformation (les autres grandeurs qui figurent dans la loi doivent également être transformées de manière adéquate). L'application de cette condition mène à des expressions des lois physiques en accord avec la loi de la liaison mutuelle de l'espace et du temps, puisque cette loi s'exprime précisément par la transformation de Lorentz. Et dans la mesure où le principe d

10. Le principe de relativité est parfois formulé de la manière suivante : aucune observation, à l'intérieur d'un système donné, ne permettre en évidence un mouvement rectiligne et uniforme de ce systèm Cette formulation nous paraît légèrement incorrecte et insuffisante; effet, le principe de relativité ne concerne pas des systèmes isolés, mais liaison entre des systèmes différents, liaison qui apparaît quand on pas d'un système de coordonnées à un autre.

elativité et la loi de la liaison mutuelle de l'espace et du temps orrespondent à la réalité, les résultats obtenus reflètent également a réalité.

Ainsi, l'application de cette condition aux lois des diverses for-nes du mouvement : mécanique, électromagnétique, atomique, cons-itue la *méthode* de la théorie de la relativité.

Il ne faut pas considérer l'exigence formulée par le principe de elativité d'une équivalence des systèmes d'inertie par rapport aux ois physiques, comme un appendice entièrement extérieur à la oi fondamentale de la théorie de la relativité concernant la corrélation de l'espace et du temps. Au contraire, elle est sous-en-endue, en un certain sens, dans l'hypothèse du caractère univer-sel de cette loi. Le raisonnement suivant le montre.

Supposons que le principe de relativité soit faux, de sorte que certaines lois *générales* s'appliquant à des phénomènes physiques se-raient différentes par rapport à des systèmes d'inertie différents. Cela signifierait que les systèmes d'inertie sont *fondamentalement* non-équi-valents, qu'ils se différencient non seulement comme systèmes concrets différents, mais fondamentalement, par rapport à des lois *générales* des phénomènes physiques. Dans ce cas, on pourrait choisir parmi eux, par exemple, un système de référence principal, fondamentale-ment distinct des autres.

Mais un système de référence donné possède son ordonnance ob-jective des phénomènes dans le temps et dans l'espace; dans un sys-tème *donné*, le temps et l'espace peuvent être séparés et aucun lien *général* ne se manifeste entre eux, quoiqu'il existe évidemment pour chaque phénomène concret un lien concret des propriétés et des rela-tions spatiales et temporelles. Et donc, s'il existe un système de réfé-rence objectivement privilégié, l'ordonnance spatiale et l'ordonnance temporelle des phénomènes dans ce système apparaissent comme objec-tivement privilégiées, et la distinction qui existe entre elles dans ce système acquiert de ce fait un caractère absolu. En conséquence, la liaison mutuelle de l'espace et du temps perd en quelque sorte son universalité. Sa manifestation, dans le passage à d'autres systèmes, devrait naturellement être considérée comme une particularité de ces systèmes et non comme une loi universelle. En particulier, le temps mesuré par rapport au système principal apparaîtrait comme le temps absolu, « vrai », tandis que le temps dans les autres systèmes appa-raîtrait comme un temps relatif, « non vrai ».

Tel était, d'ailleurs, le point de vue de Lorentz sur la théorie de la relativité. Croyant à l'existence de l'éther, Lorentz considérai naturellement le système lié à l'éther comme privilégié et le temps rapporté à ce système comme absolu. Le temps par rapport à des corps en mouvement relativement à l'éther était considéré comme un temps « local », « non vrai ». En conséquence, la liaison mutuelle de l'espace et du temps exprimée par la transformation de Lorentz n'était pas interprétée par celui-ci comme une loi fondamentale de l'espace et du temps. Le mérite objectif d'Einstein fut d'ériger en loi générale la liaison mutuelle des grandeurs d'espace et de temps qui apparaît dans les lois des phénomènes électromagnétiques et de rejeter toutes les hypothèses ingénieuses au moyen desquelles on ten tait de rattacher les lois des processus électromagnétiques à l'hypo thèse de l'éther.

Ainsi, notre raisonnement montre que l'existence d'un systèm de référence privilégié, dans le sens expliqué plus haut, contredirai le caractère général de la liaison mutuelle de l'espace et du temps et rendrait cette liaison non plus absolue, mais seulement relative. Par conséquent, l'exigence posée par le principe de relativité de l'équivalence des systèmes d'inertie, et corrélativement la méthode de la théorie de la relativité, sont pour ainsi dire sous-entendues dans l'hypothèse du caractère nécessaire et absolu de la loi fondamen tale de cette théorie.

Le raisonnement que nous venons d'exposer ne permet pas, vrai dire, de déduire le principe de relativité de la loi de la liai son mutuelle de l'espace et du temps, mais il peut être considér comme une sorte d'induction allant vers ce principe. De plus, i souligne encore une nouvelle fois que c'est la loi de la liaison mu tuelle de l'espace et du temps qui constitue la loi fondamentale d la théorie de la relativité. Enfin, notre raisonnement met en évidenc le fait que le principe de relativité sous sa forme générale, appliqu à un phénomène nouveau, a le caractère d'une hypothèse, liée à l'hy pothèse de l'universalité de la loi fondamentale de la théorie de l relativité. Mais on a vu que cette loi n'a pas un caractère univer sel et absolu; le principe de relativité sous sa forme générale, tel qu' est énoncé dans la théorie de la relativité, ne peut donc s'appliqu que dans la mesure où cette loi est valable et demande à être vérifi dans chaque nouveau domaine de phénomènes. La loi de la liaiso mutuelle de l'espace et du temps elle-même, dans la théorie de l relativité restreinte, traduit ce qui se passe pour des phénomène bien connus; mais précisément parce qu'elle s'appuie sur des do

nées concrètes, elle n'a pas un caractère absolu et universel, mais est valable seulement dans un certain cadre, à l'intérieur de certaines limites.

Faisons encore quelques remarques à propos du contenu du principe de relativité.

On suppose habituellement que le principe de relativité est complètement exprimé par la condition de l'identité des lois par rapport à des systèmes d'inertie différents. Cela n'est pas tout à fait exact. Pour que la signification de cette condition ne soit pas seulement formelle, il faut que des phénomènes d'un même type *puissent* se répéter dans des conditions identiques par rapport à des systèmes d'inertie différents. Si les conditions qui existent par rapport à un système ne peuvent, pour des raisons de principe, être reproduites par rapport à un autre système, il est vain de parler d'un déroulement identique des phénomènes par rapport à ces deux systèmes.

Le principe de relativité contient donc une seconde condition : *les systèmes d'inertie sont aussi équivalents en ce sens qu'il existe en principe une possibilité objective de reproduire par rapport à ces systèmes des conditions identiques pour des phénomènes quelconques d'un même type*. C'est seulement si l'on inclut dans le concept de loi la possibilité même de la réalisation de telle ou telle condition que les deux exigences du principe de relativité s'unissent en une exigence unique : l'identité des lois par rapport à tous les systèmes d'inertie.

Il s'agit ici d'une possibilité *de principe*, déterminée par des lois générales. Dans des systèmes liés à des corps concrets différents, les conditions sont différentes *en fait*. Mais les lois de la nature ne s'opposent pas à ce que, tout au moins lorsque les corps sont éloignés, les conditions qui existent pour les phénomènes d'un type donné par rapport à un système soient les mêmes que celles qui existent en un autre endroit et à un autre instant, par rapport à un autre système.

Les exigences du principe de relativité, en tant que reflets de ce qui est objectivement général dans les différents phénomènes, possèdent un caractère général et concernent précisément ce qui est objectivement général dans les phénomènes. C'est pourquoi l'équivalence des différents systèmes d'inertie ne doit pas être prise au sens absolu, comme une identité complète des systèmes concrets, mais comme une égalité de principe.

Le principe de relativité est analogue au principe de l'équivalence des systèmes de coordonnées rectangulaires en géométrie. Si

deux figures sont données de manière identique relativement à deux systèmes de coordonnées rectangulaires, toutes les relations sont identiques dans les deux figures. Les formules de la géométrie ne sont pas modifiées quand on passe d'un système de coordonnées rectangulaires à un autre. De même, le principe de relativité affirme que les lois physiques et leur expression formelle, les formules physiques, ne sont pas modifiées quand on passe d'un système d'inertie à un autre. Aussi bien la géométrie que la théorie de la relativité traitent ici des rapports réels et objectifs des figures ou des corps et événements entre eux, et nullement de la dépendance ou de la non-dépendance des grandeurs et des phénomènes physiques vis-à-vis du « *choix* » du système de référence, etc.

De même, ni la géométrie, ni la théorie de la relativité ne postulent l'équivalence absolue des différents systèmes de coordonnées ou des différents systèmes de référence concrets. La géométrie n'affirme nullement que les systèmes de coordonnées liés, disons, à la Terre et au Soleil, sont absolument équivalents. Une telle affirmation conduirait à une absurdité : le Soleil et la Terre seraient absolument équivalents, c'est-à-dire identiques. Les différents systèmes de coordonnées sont équivalents dans le cadre des abstractions géométriques, qui distinguent seulement les formes et les relations spatiales des objets; ils sont équivalents par rapport aux lois générales de la géométrie, et cette équivalence est objective au sens de l'objectivité du général dans le particulier, dans l'individuel.

D'une manière tout à fait semblable, dans la théorie de la relativité, *l'entière équivalence des différents systèmes de référence ne doit pas être prise au sens absolu, mais dans le cadre des abstractions correspondantes, comme une complète équivalence de principe par rapport aux lois des phénomènes physiques, c'est-à-dire par rapport à ce qui est général dans ces phénomènes et non par rapport à tel ou tel phénomène concret.*

7. Résultats de l'application de la méthode de la théorie de la relativité.

Le principe de relativité exige l'invariabilité de l'expression des lois physiques lors du passage d'un système d'inertie à un autre par les transformations de Lorentz. L'application de cette condition a permis avant tout d'obtenir des lois qui précisent et développent les

is de la mécanique classique; ces lois sont celles de la nouvelle écanique, qui est relativiste, c'est-à-dire en accord avec la théorie e la relativité.

L'idée de la déduction des lois de la mécanique relativiste est ès simple. Les lois de Newton sont vérifiées pour des vitesses etites devant celle de la lumière par une somme immense d'expéences scientifiques et par la pratique technique. C'est pourquoi ces is sont vraies pour des vitesses faibles, avec une précision extrêmeent grande. Le problème est dans l'extension de ces lois, avec s modifications adéquates, à toutes les vitesses possibles. Ceci se alise de la manière suivante.

Soit un corps A se mouvant à un moment donné avec une vitesse et subissant l'action d'une certaine force. La vitesse du corps est lative, évidemment, à un certain corps de référence B. Imaginons n autre corps de référence C, se mouvant par rapport à B avec la ême vitesse que A. Alors, par rapport à ce corps C, le corps A à instant donné sera immobile et aux environs de cet instant sera animé 'une vitesse très faible. Donc, par rapport au système de référence é au corps C, le corps A se meut suivant la loi de Newton : la ariation de sa quantité de mouvement est proportionnelle à la force gissante.

Il reste à présent à exprimer cette loi par une formule et, se ouvenant de la condition d'invariabilité de la forme des lois lors 'une transformation de Lorentz, à revenir par une telle transformaion au système initial lié au corps B. Nous aurons alors la loi de Newton par rapport à ce système et, par conséquent, pour n'importe uelle vitesse de déplacement de A.

Par ce moyen, on obtient que la quantité de mouvement d'un orps de masse m_0 ne s'exprime pas par la formule newtonienne $p = m_0 v$, mais par une autre formule

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

C'est ce fait qu'on exprime en disant que la masse varie en fonction de la vitesse suivant la loi

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Introduisant cette masse modifiée, nous obtenons que la quantité de mouvement s'exprime par la formule newtonienne $p = mv$, mais qu'ici la masse m n'est plus constante. On obtient ainsi de façon générale la célèbre loi de variation de la masse en fonction de la vitesse.

Du fait que la vitesse est relative, il résulte que la masse est aussi relative. Ceci donne lieu à une incompréhension due au fait que la masse est considérée comme une « quantité de matière » : alors la relativité de la masse acquiert un sens absurde par rapport à la quantité de matière. Pour lever l'ambiguïté, il faut comprendre que la masse m est une caractéristique quantitative du corps, déterminant à une vitesse donnée sa quantité de mouvement et son énergie cinétique [11] — et comme ces dernières sont relatives, il n'y a pas lieu de s'étonner de la relativité de la masse [12]. Ce n'est pas la masse variable m, mais bien la masse au repos m_0 qui est une caractéristique du corps « en soi » et peut servir dans certaines limites de mesure de « quantité de substance [13] ». Elle ne peut pourtant pas servir de mesure de la « quantité de matière » ne fût-ce que pour la raison que les photons, qui représentent évidemment aussi une forme de matière, n'ont pas de masse au repos.

L'application de la méthode exposée de la théorie de la relativité a permis de confirmer sous une forme générale les lois de l'électromagnétisme et, en particulier, la loi qui lie les champs électrique et magnétique en tant qu' « aspects » d'un champ électromagnétique unique. L'application de la même méthode a permis de préciser l'équation fondamentale de la mécanique quantique.

Il faut comprendre tout ceci non pas comme des parties de la théorie de la relativité, mais bien comme l'application de sa thèse fondamentale sur la liaison mutuelle de l'espace et du temps à l'étude et à la formulation des lois des diverses formes de mouve-

11. Ceci, il est vrai, n'épuise pas la signification de la masse, qui apparaît aussi, par exemple, comme « masse gravitationnelle ».

12. La grandeur absolue qui apparaît est le quadrivecteur d'impulsion-énergie (E, cp_x, cp_y, cp_z), où $E = mc^2$, $p_x = mv_x, \ldots$ La longueur de ce vecteur est: $\sqrt{E^2 - c^2(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)} = \sqrt{m^2c^4 - m^2c^2v^2} = m_0c^2$.

13. Nous avons traduit ici par « substance » le mot russe вещест[во] (qui est parfois rendu par « matière au sens restreint »), réservant [le] mot « matière » pour traduire материя : « matière » (au sens général). La distinction des deux notions, pourtant essentielle, n'est pas toujou[rs] faite quand on emploie dans les deux cas le mot « matière » (*N.d.T.*).

ment de la matière. Ainsi, suivant ces formes de mouvement, on obtient la mécanique relativiste, l'électrodynamique relativiste, la mécanique quantique relativiste.

L'application de la théorie de la relativité consiste (on le voit d'après la déduction des lois de la mécanique relativiste, esquissée plus haut) en ceci que les lois établies dans le cas de vitesses faibles se transposent pour des vitesses quelconques grâce à la condition d'invariabilité vis-à-vis des transformations de Lorentz. Cette condition pourtant n'est pas univoque et peut ne pas donner le résultat correct parce qu'à des vitesses élevées peuvent en général se révéler des caractéristiques nouvelles des phénomènes qui disparaissent aux vitesses faibles (il leur correspondrait, dans les équations, par exemple des termes complémentaires disparaissant lorsque $v \to O$). C'est pourquoi l'application de la théorie de la relativité exige toujours des hypothèses adéquates sur les propriétés physiques des phénomènes du type considéré.

Ceci apparaît pleinement lors de l'édification de la mécanique quantique. La simple transcription de l'équation de Schrödinger pour les électrons sous une forme relativiste invariable a donné des résultats non conformes à l'expérience. On a obtenu une équation relativiste plus correcte grâce au fait que (sans parler du spin) la représentation de l'état de l'électron par une fonction d'onde a été fondamentalement modifiée.

Le plus important apport de la théorie de la relativité dans l'élaboration des lois des diverses formes de mouvement de la matière consiste en la formulation sous forme générale de la liaison universelle entre la masse et l'énergie. Cette relation a été découverte par P. N. Lebedev pour le champ électromagnétique, mais la théorie de la relativité a établi son caractère général.

La loi de liaison mutuelle de la masse et de l'énergie est une des lois fondamentales de la nature. Sa signification est apparue, on le sait, particulièrement en physique nucléaire.

En même temps, il se trouve qu'en un certain sens cette loi peut être prise comme base de la théorie de la relativité, au lieu de la loi de constance de la vitesse de la lumière [14]. Ainsi la théorie de la relativité aurait-elle pu être définie comme la théorie de l'espace et du temps reflétant l'existence de la liaison mutuelle universelle, de la proportionnalité de la masse et de l'énergie. De cette façon,

14. Cf. L.I. Mandelstam. *Œuvres complètes*, t. V, pp. 343-346.

les deux liaisons universelles — espace et temps, masse et énergie — se conditionnent réciproquement.

Une conclusion générale extrêmement importante de la théorie de la relativité est celle qui affirme que le mouvement de la matière dans l'espace, la transmission d'énergie, la transmission d'une action d'un corps à un autre ne peut se produire (dans n'importe quel système d'inertie) avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. Cette importante loi générale se déduit immédiatement de la liaison mutuelle de l'espace et du temps, telle qu'elle est établie par la théorie de la relativité. Cette loi a une répercussion concrète, par exemple dans la loi de croissance de la masse avec la vitesse, loi suivant laquelle la masse d'un corps grandit indéfiniment lorsque sa vitesse tend vers celle de la lumière puisque celle-ci est inaccessible à un corps.

Cette loi générale de limitation des vitesses peut être aussi prise comme base de la théorie de la relativité au lieu de la loi de constance de vitesse de la lumière. Elle conduit aux mêmes conclusions générales.

8. Contre l'exagération et la conception subjectiviste de la relativité

Notre vue d'ensemble du contenu fondamental et des conséquences de la théorie de la relativité nous convainc de ce que la particularité principale de la théorie de la relativité, le fait essentiellement nouveau qu'elle a introduit dans la théorie de l'espace et du temps, et en même temps dans toute la physique, est l'établissement de la loi de liaison mutuelle de l'espace et du temps. Le principe même de relativité n'est pas neuf, lui, et apparaît comme la base de la méthode de la théorie de la relativité et non comme élément essentiel de son contenu immédiat.

Pourtant on voit généralement l'essence et la particularité de la théorie de la relativité dans le principe de relativité, dans la notion de mouvement relatif, dans la relativité de grandeurs physiques, c'est-à-dire en général dans la relativité. A ce propos, on peut encore ajouter à tout ce qui a déjà été dit les remarques suivantes.

D'abord, le terme même de « principe de relativité » ne répond pas, à proprement parler, au contenu de ce principe. Ce principe

affirme que les lois des phénomènes physiques sont identiques dans tous les systèmes d'inertie, c'est-à-dire qu'il affirme *non pas* la relativité mais bien bien la non-relativité de ces lois. Il serait donc plus correct de l'appeler « principe de non-relativité ». Le nom de principe de relativité est lié par conséquent, non pas au contenu de ce principe, mais au fait qu'y figure la relation entre les phénomènes et le système de référence, l'expression des lois par rapport au système de référence.

Ensuite, la théorie de la relativité a effectivement montré la relativité d'une série de grandeurs physiques, d'une série de caractéristiques objectives des objets et de phénomènes qu'on considérait auparavant comme non relatives : la relativité des rapports temporels des événements, de leur simultanéité et, dans certaines limites, de leur ordre de succession dans le temps, la relativité de la distance spatiale et de la longueur d'un intervalle de temps, la relativité de la masse, la relativité des parties électrique et magnétique d'un champ électromagnétique, c'est-à-dire le fait qu'elles diffèrent selon les systèmes de référence, etc. Tout ceci évidemment donne une raison de l'appeler théorie de la relativité.

Pourtant la relativité de toute une série de grandeurs physiques était connue auparavant. On connaissait la relativité de la vitesse, de la quantité de mouvement, de l'énergie cinétique d'un corps. Toutes ces grandeurs, en mécanique classique, sont différentes par rapport à divers systèmes de référence, selon l'état de mouvement relatif de ces systèmes. La vitesse absolue d'un corps dans l'espace absolu est toujours restée, à proprement parler, une fiction. De même les concepts de relativité du mouvement, de relativité de la trajectoire, etc., étaient connus de la mécanique classique.

Mais l'essentiel n'est pas là. L'essentiel est qu'il ne faut pas exagérer la relativité : ce qui est relatif n'est pas simplement relatif, mais représente un côté, un aspect de l'absolu et contient en soi de l'absolu. La théorie de la relativité n'a pas simplement conclu à la relativité d'une série de grandeurs, mais elle a indiqué en même temps que ces grandeurs relatives sont les côtés, les manifestations de caractéristiques non relatives des objets et des phénomènes. Ainsi, d'après cette théorie, si la distance r dans l'espace et l'intervalle de temps Δt entre les événements A et B sont relatifs, ce qu'on appelle l'intervalle d'espace-temps $c^2\Delta t^2 - r^2$ est non relatif, identique dans tous les systèmes d'inertie. Les rapports relatifs spatiaux et temporels se révèlent ici en tant qu'aspects relatifs des rapports non relatifs d'espace-temps. Si les parties électrique et magnétique du champ sont relatives, leur réunion en une caractéristique

quantitative du champ électromagnétique — le tenseur du champ — est non relatif. Relatives indépendamment, les parties électrique et magnétique se révèlent être les aspects relatifs d'un champ électromagnétique unique, non relatif, etc.

Enfin, la théorie de la relativité, comme il a été dit plus haut, n'admet pas simplement la relativité du temps et de l'espace, mais les lie en une seule forme non relative d'existence de la matière : l'espace-temps.

Bref, il apparaît que la relativité elle-même est relative et non pas absolue; le relatif est un côté, une face du non-relatif.

La théorie de la relativité, admettant la relativité de ce qui avant elle était considéré comme absolu, découvre le non-relatif à un échelon nouveau et supérieur. Elle établit les liaisons générales de divers aspects et caractères de la réalité, qui apparaissaient auparavant distincts et indépendants — espace et temps, masse et énergie, champs électrique et magnétique, etc. — et montre seulement que ce sont des aspects ou des manifestations du non-relatif dans divers rapports objectifs. La théorie de la relativité en général lie organiquement le relatif et le non-relatif, montrant le relatif comme un aspect du non-relatif [15]. C'est pourquoi il n'y a aucune raison réelle de souligner outre mesure, d'exagérer et de gonfler la relativité.

L'exagération de la relativité, sa coupure d'avec l'absolu sont caractéristiques des physiciens idéalistes qui tentent d'interpréter la théorie de la relativité dans le sens du relativisme philosophique, dans le sens de l'aphorisme courant que « dans le monde, tout est relatif et dépend du point de vue ». Ils ne discutent pas la relativité elle-même objectivement, ni comme manifestation d'un objet dans ses rapports objectifs avec un autre objet, mais subjectivement, comme rapport d'un objet à l'observateur, comme la dépendance d'une caractéristique de l'objet par rapport au « point de vue de l'observateur », au *choix* du système de référence et aux procédés de représentation de l'espace et du temps par divers systèmes de coordonnées.

Ces affirmations absurdes sont répétées jusqu'à présent par certains de nos physiciens et philosophes. Ainsi, A.A. Maximov et J.P. Terletski ne voient dans les relations des corps avec divers systèmes de référence qu'un moyen plus ou moins commode de repré-

15. Ceci est immédiat et particulièrement clair dans la notation tensorielle des équations de la théorie. On donne le tenseur par ses composantes, qui sont relatives alors que le tenseur lui-même est absolu.

sentation des mouvements réels, mais pas du tout des rapports réels, objectifs, indépendants de notre conscience [16].

J.P. Terletski affirme carrément que « c'est seulement dans notre conscience que le mouvement de corps isolés peut être représenté diversement, en fonction... du mode de représentation de l'espace et du temps ». Les manifestations objectives du mouvement dans diverses relations disparaissent et il ne reste que des modes de représentation. Et de telles perles de l'idéalisme subjectif, on les présente sous de bruyantes protestations de dévouement au matérialisme dialectique ! Il n'est pas étonnant, avec une telle conception, que A.A. Maximov affirme que les conclusions de la théorie de la relativité sont idéalistes.

En réalité, il n'y a et ne peut rien y avoir dans les conclusions de la théorie de la relativité d'idéaliste, puisque ces conclusions, malgré les points de vue personnels idéalistes d'Einstein et d'autres, représentent les conclusions objectives d'une théorie scientifique, découlant inévitablement de lois établies dans la pratique (la loi de la constance de la vitesse de la lumière est loin d'être la seule) et confirmées par de nombreuses expériences. Les erreurs proviennent d'une mauvaise compréhension des faits suivants.

Les coordonnées d'espace et de temps d'un événement x, y, z, t sont relatives par leur essence même, puisqu'elles expriment la relation de l'événement au corps de référence. Les grandeurs correspondantes, liées à ces coordonnées — durée Δt d'un processus quelconque, distance spatiale r, vitesse v, quantité de mouvement mv, énergie cinétique, etc. — sont également relatives par essence, sauf si elles sont malgré tout non-relatives en vertu de lois de la nature — comme par exemple l'intervalle d'espace-temps entre événements $c^2\Delta t^2 - r^2$.

Tout ceci ne signifie absolument pas que les corps et les processus « se dissolvent dans les relations », qu'ils ne possèdent pas « en propre » des caractères. Tout corps possède le caractère d'étendue et tout processus le caractère de durée dans le temps; tout corps doué d'une masse au repos m_0 possède une énergie propre non-relative m_0c^2 (plus exactement une grandeur d'impulsion-énergie), etc.

---

16. Cf. l'article de A.A. Maximov dans le recueil *La grande force des idées du léninisme*, p. 204, et l'article de J.P. Terletski dans *Voprossy Filosofii*, 1953, fasc. 3, p. 195.

Mais ces propriétés inhérentes aux corps et aux processus se manifestent différemment dans des relations objectives différentes avec d'autres corps et processus. La théorie de la relativité n'affirme pas cette absurdité que les propriétés inhérentes au corps et aux processus sont relatives; il s'agit et il ne peut s'agir *que* de la relativité de celles des caractéristiques des corps et des processus qui montrent comment tel ou tel corps ou processus entre dans des relations objectives avec d'autres corps ou processus. Ces relations sont objectives, déterminées par les propriétés matérielles et les relations entre corps et processus et sont, de ce fait, totalement indépendantes de la question de savoir si un quelconque observateur a l'un ou l'autre « point de vue », si quelqu'un choisit ou non tel ou tel système de coordonnées, telles méthodes de mesure, etc.; exactement de la même façon que le fait qu'une maison soit au repos *par rapport* à la terre et en mouvement *par rapport* au soleil ne dépend et ne peut dépendre des points de vue, du choix des modes de description, etc...

Les affirmations selon lesquelles le principe de relativité touche la dépendance ou l'indépendance des lois physiques vis-à-vis du choix de modes de description, etc., répétées, par exemple, par J.P. Terletski et A.A. Maximov à la suite des idéalistes, sont absurdes déjà pour la seule raison qu'il est impossible de déduire d'un tel principe une seule conséquence [17]. Cependant, c'est un fait que la méthode de la théorie de la relativité, basée sur le principe de relativité, a conduit à de nombreuses prévisions non triviales et bien confirmées. Il est donc clair que le principe de relativité est une loi objective, reflétant dans certaines limites les propriétés objectives de la réalité en ce qui concerne les rapports mutuels objectifs des corps réels et des processus, indépendamment de notre conscience. Les méthodes de la science, les modes de représentation, etc., ne sont applicables que parce que et dans la mesure où ils reflètent tel ou tel aspect de la réalité objective.

Ainsi, la théorie de la relativité ne donne aucune raison d'exagérer la relativité, de la détacher de l'absolu et de l'interpréter dans un sens subjectif. De telles interprétations sont antiscientifiques et contredisent la théorie de la relativité.

---

17. Ainsi J.P. Terletski écrit que « le principe de relativité n'exprime que l'indépendance de propriétés de l'espace et du temps et des lois physiques par rapport au *choix* (!) du système de référence, qui est *conventionnel*, relatif. (Cf. article cité p. 194. C'est moi qui souligne, A.A.). » A.A. Maximov s'exprime encore plus clairement p. 189 de son article de *Voprossy Filosofii*, 1953, n° 1.

9. Contre le remplacement de la théorie de la relativité par une « théorie des mouvements rapides ».

Constatant le gonflement de l'interprétation subjectiviste de certains traits de la relativité et incapables de comprendre le contenu réel de la théorie, certains de nos physiciens et philosophes se mettent à leur tour à exagérer inconsidérément un autre trait de la relativité, à interpréter le contenu fondamental de la théorie d'une manière erronée. Ils affirment que la théorie de la relativité est la « théorie des mouvements rapides » ou proposent de s'en débarrasser comme d'une théorie idéaliste et de la remplacer par une autre — une « théorie des mouvements rapides ». Cet esprit s'exprime avec une insistance particulière dans les travaux de I.V. Kouznetsov et R.J. Steinman[18]. Il va de soi qu'ils ne peuvent en réalité proposer aucune théorie nouvelle mais ils ne font qu'embrouiller la compréhension de la théorie existante.

Pourtant cette manière de voir la théorie de la relativité comme une soi-disant théorie des mouvements rapides n'a pas uniquement un fondement subjectif dans l'impuissance de certains auteurs à surmonter le relativisme, dans leur incapacité à comprendre le contenu objectif de la théorie de la relativité. Ce point de vue a malgré tout un certain fondement objectif.

En premier lieu, la théorie de la relativité, par son origine et par ses fondements, est liée à l'étude de la propagation des perturbations électromagnétiques, et ces perturbations se propagent réellement avec une grande vitesse.

En second lieu, les modifications que la théorie de la relativité a apportées aux lois de la physique classique ne deviennent notables qu'aux vitesses élevées, à savoir les vitesses comparables à celle de la lumière.

Pourtant, tout ceci ne conduit nullement à voir l'essence de la théorie de la relativité dans l'étude des mouvements rapides. Comme il a été montré plus haut, la théorie de la relativité est fondamenta-

18. Voir leurs articles dans le recueil *Questions philosophiques de la physique contemporaine.*

lement la théorie de l'espace et du temps et son essence réside dans la loi de la liaison mutuelle de l'espace et du temps. Le fait que cette relation ne se manifeste visiblement, en règle générale, que dans les mouvements rapides, n'est pas une raison pour ramener la théorie de la relativité à une théorie de ces mouvements.

L'étude de tels ou tels mouvements, tant rapides que lents, est l'étude d'une forme du mouvement de la matière ou d'une autre et constitue l'objet de la mécanique, de l'électrodynamique, de la mécanique quantique, et non pas de la théorie de la relativité dans son contenu principal et fondamental. La distinction même entre mouvements rapides et lents est toute relative; avec l'amélioration de la précision des expériences, les corrections apportées par la théorie de la relativité se découvriront sûrement pour des vitesses de plus en plus faibles, ce qui fait que des mouvements « lents » passeront dans le domaine des mouvements « rapides ».

Bien plus. Certaines déductions de la théorie de la relativité ne dépendent pas du tout de la « vitesse du mouvement ». Ainsi, en premier lieu, le résultat fondamental sur la liaison mutuelle masse-énergie, qui a une valeur universelle. L'énergie n'est pas liée uniquement à la masse des corps en mouvement rapide, mais aussi à la « masse au repos » : un corps au repos dans un système donné contient une énergie proportionnelle à sa masse, tout à fait indépendamment de la vitesse de ses mouvements par rapport à d'autres corps ou systèmes [19].

La relativité des champs électrique et magnétique est apparente aux « faibles » vitesses, ainsi que l'ont montré par exemple les expériences anciennes d'Eichenwald. Déjà lors de mouvements « lents » de charges électriques, « il naît autour d'elles un champ magnétique », ce qui est déterminé, en accord avec la théorie de la relativité, par leur mouvement relatif. Plus exactement, si la charge se déplace *relativement* à un système donné, alors, *par rapport* à ce système, son champ ne se manifeste pas uniquement en tant que champ électrique mais aussi en tant que champ magnétique. Une compréhension générale de ce phénomène a été fournie par la relativité.

Ainsi, on ne peut en aucune façon voir en la théorie de la relativité la théorie des mouvements rapides. Cela reviendrait à altérer

19. On dit souvent que toute loi relativiste redonne une loi classique pour des v suffisamment faibles. Mais dans la formule $E = mc^2$, v n'intervient pas et cette formule ne tend vers aucune formule de la physique classique lorsque $v \to 0$.

n contenu principal, à la remplacer par d'autres théories concernt des formes isolées de mouvement, à escamoter le fait qu'une rie de résultats de la théorie de la relativité n'est en aucune façon ée à la vitesse du mouvement.

Des erreurs de ce genre proviennent de l'incompréhension de la alectique de l'abstrait et du concret, des formes spatio-temporelles de leur contenu matériel. Partant de l'idée juste que les formes atio-temporelles et leurs relations sont déterminées par leur contenu atériel, on en arrive à la conclusion qu'il est impossible d'abstraire es formes et ces relations de leur contenu. En conséquence, on obtient négation du caractère objectif des concepts abstraits et des résultats e la théorie de la relativité. C'est ainsi qu'on en arrive à déclarer ue cette théorie est idéaliste.

Ainsi, par exemple, I.V. Kouznetsov « réfute » le principe e relativité en se référant à la non-équivalence de systèmes de éférence concrets, liés à la Terre et, disons, à une molécule. Cependant, comme nous l'avons expliqué, le principe de relativité affirme 'équivalence des systèmes d'inertie, non pas en tant que systèmes oncrets donnés, mais au sens des lois générales, dans le cadre des bstractions correspondantes. L'équivalence totale de ces systèmes e doit donc pas, par conséquent, être prise dans un sens absolu.

Les choses vont si loin que I.V. Kouznetsov et R.J. Steinman roposent de chercher « une cause efficiente, créatrice » du changement relatif de la durée d'un intervalle de temps, etc., lors du assage d'un système de coordonnées à un autre. Ils ne comprennent pas que la base de ces effets est dans la différence de relations des corps et des processus avec les divers corps de référence et que, bien que ces relations soient déterminées par des liens matériels avec les corps de référence, elles ne consistent pas en une interaction de ces corps avec les autres corps ou processus.

En un mot, les auteurs ne comprennent absolument pas le caractère objectif de l'abstraction de la théorie de la relativité et la nécessité de faire abstraction des interactions et des mouvements concrets lors de la formulation des lois générales des relations spatio-temporelles. Leurs tentatives de rejeter la théorie de la relativité parce qu' « idéaliste » sont basées sur une incompréhension aussi bien de cette théorie même que de la dialectique marxiste. En fin de compte, ces tentatives sont antiscientifiques.

L'abstraction des formes et des relations spatio-temporelles à partir de leur contenu concret, matériel, passe par une suite d'échelons.

La connaissance procède du particulier et du concret à l'abstrait e au général, des phénomènes concrets à la découverte de lois tou jours plus générales et revient à nouveau au concret, le dominan plus profondément, précisément grâce aux abstractions et au généralisations, grâce à la connaissance des conditions générale Ainsi, si l'on prend la théorie de la relativité et si l'on suit le étapes d'abstraction qui lui sont attachées, « de haut en bas » dan l'ordre correspondant à l'application successive de déductions plu abstraites à de plus concrètes, on aura le tableau suivant.

Si on s'abstrait totalement du contenu matériel des formes « des relations spatio-temporelles, si on néglige ce contenu comm indifférent au sujet, la théorie de la relativité devient à ce stad une théorie mathématique, une forme particulière de géométrie qua dridimensionnelle. Si, faisant abstraction du contenu concret, on n le néglige pourtant pas, mais si l'on tient compte clairement de bases physiques et des conditions de validité des abstractions et de résultats utilisés, on aura la théorie même de la relativité en tant qu théorie *physique* de l'espace et du temps. Si enfin on considère contenu matériel lui-même — les formes concrètes de mouvemen de la matière qui forment l'objet de la physique — et si on formu leurs lois spécifiques en accord avec les lois générales de l'espac temps, si on formule les lois des propriétés et des rapports spati temporels d'une forme donnée de mouvement de la matière, o aura la mécanique relativiste, l'électrodynamique, la théorie quan tique.

Enfin, nous considérons les phénomènes les plus concrets nous nous laissons guider pour leur compréhension par les lois gén rales, obtenues à un niveau d'abstraction quelconque.

Tous ces échelons d'abstraction se conditionnent mutuellemen La théorie de la relativité n'aurait pas pu se construire si elle n s'était appuyée sur les données de l'étude de phénomènes concre et de la connaissance des lois de formes particulières de mouve ment de la matière; elle n'en aurait pas dégagé par voie d'abstra tion des lois plus générales si elle n'utilisait pas des résultats ma thématiques abstraits remontant à Lobatchevski. En même temp en faisant abstraction du particulier et du concret, en form lant des lois générales, la théorie de la relativité, comme toute thé rie générale, donne la possibilité de comprendre plus profondéme le concret lui-même et son étude postérieure entraînera la découver de nouvelles lois générales, la construction de nouvelles théori

c. Les passages réciproques du concret à l'abstrait et leur condi-nnement réciproque dans le processus de la connaissance, voilà le nd de l'affaire. Ce fond reflète la dialectique objective du parti-lier et du général, du contenu concret, matériel et de ses formes atiales et temporelles. C'est cette dialectique de la nature et de connaissance que les métaphysiciens sont incapables de com-endre.

10. La théorie de la relativité reflète correctement la réalité.

Tout physicien compétent sait que la théorie de la relativité est ne théorie juste, qu'elle représente sans aucun doute correctement réalité objective dans un certain domaine. Pourtant, jusqu'à pré-ent, certains auteurs, par exemple A.A. Maximov, I.V. Kouz-etsov et R.J. Steinman[20] nient le bien-fondé de cette conviction énérale. C'est pourquoi il ne semble pas inutile de faire à ce sujet uelques remarques.

D'abord, les lois qui sont à la base de la théorie de la relativité ont formulées à la suite de la généralisation d'un grand matériel xpérimental élaboré théoriquement. A la base, il n'est pas indis-ensable de poser la loi de constance de la vitesse de la lumière; on eut partir d'autres lois, par exemple la loi de proportionnalité de a masse et de l'énergie, etc. Ceci confirme d'autant plus que les ois de la théorie de la relativité, et en même temps la théorie même âtie sur ces lois, reflètent bien les lois générales de la réalité ma-érielle.

En second lieu, bien des conclusions nouvelles auxquelles mène a théorie de la relativité sont confirmées par des expériences directes. La liaison mutuelle entre masse et énergie est vérifiée à présent sur n matériel expérimental énorme par la pratique de la production le l'énergie atomique et il est impossible de douter de son exis-ence en tant que loi générale de la nature. La loi de variation de a masse des particules avec la vitesse est aussi vérifiée sur un ma-

20. Voir les articles de A.A. Maximov dans la revue *Voprossy Filosofii*, 948, 3 et 1953, 1, dans le recueil *La grande force des idées du léninisme*, [illegible] et aussi les articles de I.V. Kouznetsov et R.J. Steinman dans le ecueil *Problèmes philosophiques de la physique contemporaine.*

tériel énorme et joue un rôle important dans les calculs technique des accélérateurs de particules atomiques.

La relativité de la longueur d'un intervalle de temps est confir mée par l'observation de la variation de la fréquence de la lumièr en fonction du déplacement de la source[21] et de la variation de l période de désintégration des mésons; un méson en mouvement rapid par rapport à la Terre a une durée de vie plus grande par rappo à la Terre, en accord avec les prédictions de la théorie de la rela tivité. On pourrait ajouter à cela une série de confirmations indi rectes des résultats de la théorie de la relativité.

En troisième lieu, la théorie de la relativité est entièrement e accord avec toutes les données de la mécanique et de l'électrody namique dans leur ensemble. C'est pourquoi, en fin de compte, tout la mécanique et toute l'électrodynamique confirment la théorie de l relativité.

Habituellement, lorsqu'on parle de confirmation d'une théori on n'a en vue que les conclusions par lesquelles elle se distingue de théories précédentes. Ceci n'est pas absolument exact. Pour autan que la nouvelle théorie inclut les conclusions de la théorie préce dente, les confirmations de cette dernière servent également à con firmer la première. Ainsi, par exemple, les résultats fondamentau de la théorie de la chaleur et des machines thermiques ont été ini tialement basées sur l'idée du calorique, ensuite on a obtenu l mêmes résultats par la thermodynamique et plus tard par la théor statistique moléculaire de la chaleur. Personne ne considère à pr sent les confirmations de ces résultats autrement que comme des co firmations de la théorie moderne.

La théorie de la relativité n'est pas seulement en accord av l'électrodynamique; elle est fondée sur la reconnaissance du fait q les lois de l'électrodynamique, exprimées par les équations Maxwell, sont des lois générales pour tous les systèmes d'inertie. a déjà été souligné que c'est précisément la contradiction entre l lois de l'électrodynamique et les notions anciennes de l'espace du temps qui a servi de base à la modification de ces notions, reconnaissant entièrement le rôle des lois de l'électrodynamique. C'e pourquoi toute l'électrodynamique, confirmée par un volume à pei

21. Il ne s'agit évidemment pas de l'effet Doppler ordinaire mais de correction relativiste du résultat habituel sur la variation des fréquenc Cette correction signifie précisément que la période des vibrations lu neuses se modifie selon les transformations de Lorentz.

concevable d'expériences et de pratique technique, sert en fait de base et de confirmation de la théorie de la relativité.

La théorie de la relativité mène au résultat connu que les lois de la mécanique newtonienne sont suffisamment exactes aux vitesses sensiblement inférieures à celle de la lumière. Il est bien connu que toute la pratique scientifique et technique confirme entièrement cette conclusion de la théorie de la relativité. Dans les cas où les vitesses sont comparables à celle de la lumière, la pratique confirme aussi bien les conclusions de la théorie de la relativité. Il s'en suit que c'est *toute* la mécanique qui confirme cette théorie.

Enfin, en examinant la question de la justesse de telle ou telle théorie, on ne peut pas ramener cette question à un examen pur et simple de l'ensemble des données expérimentales qui parlent en faveur de cette théorie. La théorie ne se ramène pas à une classification et une description de faits, sa signification n'est pas épuisée par le calcul de résultats d'observations isolées. Considérer une théorie comme un schéma servant à la description, au classement et au calcul des résultats d'observations est une attitude phénoménologique, subjectiviste, caractéristique de toute la tendance idéaliste subjective dans la compréhension de la physique, depuis Mach jusqu'à Bohr, Dirac et d'autres. A l'encontre de ce point de vue, une théorie scientifique reflète en réalité dans ses concepts et ses résultats l'essence objective des phénomènes. En liaison avec ceci, il faut la considérer comme un tout, et non seulement comme un schéma logique cohérent, mais précisément comme un reflet de l'essentiel et du général dans les phénomènes naturels. La cohérence logique de la théorie n'est qu'une des confirmations du fait que la théorie saisit correctement ce qu'il y a de général dans les phénomènes, reflète la liaison objective de la nature dans la liaison logique de ses concepts et de ses résultats.

La théorie de la relativité a donné un système cohérent, permettant d'embrasser toute la mécanique, toute l'électrodynamique et une partie notable de la physique atomique. Ceci est une preuve du fait qu'elle saisit correctement les traits généraux essentiels de phénomènes physiques divers ; elle reflète donc de façon juste les lois générales objectives des relations spatio-temporelles dans la nature, elle reflète de façon juste ce qu'il y a de général et d'essentiel dans ces relations.

11. La connaissance ne s'arrête pas a la théorie de la relativité.

La théorie de la relativité n'est pas du tout le dernier pas sur la voie de la connaissance des lois générales de l'espace et du temps. Il est bien connu de tous les physiciens qu'elle ne représente pas ici la vérité dernière, bien qu'elle contienne une grande part de vérité absolue.

Avant tout, il importe de remarquer que, déjà, la théorie de la relativité générale a mis en lumière la limitation de la théorie de la relativité restreinte, montrant que cette dernière n'a de valeur que dans les limites où l'on peut négliger le champ de pesanteur. Dans des champs de pesanteur intenses la loi de constance de la vitesse de la lumière est violée, et par conséquent les lois de la relativité restreinte.

La théorie de la relativité générale admet la loi de liaison mutuelle de l'espace et du temps, mais la précise et la développe, reflétant dans cette correction et ce développement la dépendance directe des lois des rapports spatiaux et temporels — de la métrique de l'espace-temps — par rapport à la répartition et au mouvement de la matière, qui se manifeste dans la gravitation universelle.

La théorie de la relativité générale admet la loi de liaison mutuelle de l'espace et du temps non pas comme une loi intégrale mais comme une loi « locale ». Elle affirme qu'il n'existe pas dans la nature de systèmes d'inertie s'étendant dans tout l'espace et dans tout le temps, mais que dans tout domaine suffisamment petit (infiniment petit au sens mathématique) de l'espace et du temps il existe une classe particulière de systèmes d'inertie « locaux ». Par conséquent, les lois de la relativité restreinte sont elles aussi limitées à une validité locale; ou encore, pour s'exprimer en termes mathématiques, elles deviennent des lois différentielles. De même, la géométrie sur une surface courbe sans singularité (par exemple une sphère) ne diffère pas sensiblement dans de petits domaines de la géométrie dans le plan, mais dans de grands domaines elle en diffère essentiellement.

En bref, la théorie de la relativité générale a déjà modifié les concepts et les lois de la théorie de la relativité restreinte et limité ses thèses et ses conclusions; mais elle a aussi conservé leur signifi-

cation dans un domaine approprié avec les limitations appropriées. Il y a plus. Les tentatives de formuler les lois de la physique atomique en respectant les exigences de la théorie de la relativité n'ont conduit qu'à un succès partiel. Il n'a pas été possible de bâtir une théorie cohérente des atomes complexes et une théorie de l'interaction des particules atomiques et du champ en accord avec les exigences de la théorie de la relativité, malgré les efforts dirigés vers ce problème depuis plus de 25 ans. Ceci donne à penser que les lois générales des relations spatiales et temporelles, telles qu'elles se manifestent dans le domaine atomique, ne sont pas représentées avec assez d'exactitude par la théorie de la relativité; qu'il faudra peut-être bâtir une nouvelle théorie, reflétant plus exactement les lois objectives et générales de l'espace et du temps. Non seulement cette idée a été formulée explicitement par certains physiciens soviétiques il y a déjà près de 20 ans, mais encore, dès ce moment, on a fait des tentatives — tout à fait préliminaires — d'aborder la nouvelle théorie. Ces tentatives n'ont pas été couronnées de succès, mais il est important au moins que le problème général ait été aperçu il y a assez longtemps; à présent, on ne trouverait guère de physicien soviétique qui ne jugerait pas possible une modification de la théorie de la relativité. C'est pourquoi ce que racontent certains auteurs au sujet du « dogmatisme » général des physiciens soviétiques par rapport à la théorie de la relativité est simplement contraire aux faits.

Ainsi, les difficultés et les contradictions de la théorie dans la physique atomique montrent qu'il faudra probablement, pour les surmonter, une transformation de la théorie de l'espace et du temps. Sous ce rapport, le moment historique actuel dans le développement de la physique est semblable à celui où la théorie de la relativité est apparue. Cette théorie est née des tentatives de résoudre les contradictions et les difficultés qui avaient surgi à la suite de l'étude d'une forme concrète de mouvement de la matière, l'électromagnétisme. En surmontant ces difficultés et ces contradictions, la théorie de la relativité a donné des concepts nouveaux, généralisés, et a formulé des lois générales nouvelles. Mais elle n'a pas simplement remplacé les conceptions anciennes et les lois précédemment énoncées, elle les a limitées en les comprenant comme des manifestations particulières, de portée limitée, de lois plus générales et plus exactes.

Actuellement, le problème de construire une nouvelle théorie est à nouveau posé par les difficultés et les contradictions qui ont

pris naissance dans l'étude d'un autre domaine concret de phénomènes naturels : les processus atomiques et nucléaires, les processus d'interaction des particules et du champ.

Nous ne pouvons évidemment prédire quelle sera la nouvelle théorie, représentant plus exactement les lois de l'espace et du temps en accord avec les données de ces expériences. Nous pouvons, malgré tout, dire que, de la même manière que la théorie de la relativité n'a pas simplement supprimé la précédente, mais a inclus ses résultats sous une forme limitée et transformée, de même la nouvelle théorie ne remplacera pas simplement la précédente, ne reviendra pas aux conceptions anciennes, mais inclura les résultats de la théorie de la relativité, en les limitant et les modifiant en accord avec ses conséquences nouvelles, plus exactes.

Il est caractéristique que la théorie de l'espace et du temps, à mesure qu'elle se développe, reflète de plus en plus profondément le fait que l'espace et le temps sont les formes d'existence de la matière.

La théorie précédente, avec ses conceptions d'espace absolu et de temps absolu, séparait totalement l'espace et le temps de la matière et l'un de l'autre, les considérant comme les réceptacles extérieurs de la matière. Ce point de vue correspondrait à la mécanique de Newton, reflet des mouvements lents des corps microscopiques. Le premier qui ait indiqué la dépendance des lois de l'espace et du temps par rapport à la matière est N.I. Lobatchevski. Le développement a suivi la voie qu'il avait prédite.

La théorie de la relativité restreinte s'appuie sur le fait que les relations spatiales et temporelles sont déterminées par les liens matériels entre les corps et les phénomènes. Partant des lois d'interaction par le champ électromagnétique (de la loi de propagation de la lumière), la théorie de la relativité restreinte a mis en évidence la liaison mutuelle entre l'espace et le temps, mais elle considère encore ceux-ci (en un certain sens) indépendamment de la matière. Elle a reflété des lois qui se manifestent dans les mouvements rapides mais dans des champs de gravitation relativement faibles.

La théorie de la relativité générale a été plus loin et, tenant compte du champ de gravitation, a établi la dépendance directe de la métrique de l'espace-temps par rapport à la répartition et au mouvement de la matière, de manière que dans cette théorie l'espace et le temps avec leurs propriétés métriques ne peuvent plus être dissociés de la matière.

On peut prévoir que la nouvelle théorie découvrira de nouvelles dépendances profondes des lois de l'espace et du temps par rapport

au mouvement de la matière. Elle reflètera probablement ces lois telles qu'elles apparaissent dans le domaine microscopique, pour de fortes interactions et de grandes énergies. Mais elle s'élèvera aux généralités et aux abstractions, dégageant ce qu'il y a d'objectivement général dans le mouvement, les propriétés et les relations des particules atomiques et du champ.

Un tour d'horizon sur le contenu de la théorie de la relativité, sur les progrès auxquels elle a abouti, sur la ligne générale du développement de la théorie physique de l'espace et du temps, fait apparaître la dialectique de la nature et de la connaissance; la théorie de la relativité nous apparaît avec sa signification réelle d'immense pas en avant accompli sur la voie de la connaissance de la nature; c'est une conquête magnifique de la science, que suivront nécessairement d'autres conquêtes [22].

A.D. ALEXANDROV.

О сущности теории относительности. Вестник Ленинградского Университета, Серия Математики, Физики и Химии. (*Courrier de l'Université de Léningrad*, série Mathématiques, Physique et Chimie), 1953, 8, pp. 103-128.

Traduit par Michel HÉNON.

---

22. Dans son récent article sur « La dialectique et la science » (*Courrier de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*, 1957, 6), A.D. Alexandrov apprécie comme suit l'étude que l'on vient de lire : « La réflexion philosophique sur une théorie ne se réduit pas à l'interprétation de celles de ses thèses qui ont déjà été nettement formulées; elle peut aller plus loin et exiger un approfondissement des fondements mêmes de cette théorie. Pour confirmer que cela est possible pour la théorie de la relativité, je peux me référer à mon propre article sur la nature de la théorie de la relativité. Bien que je n'y découvre aucune erreur, je pense aujourd'hui que l'analyse qu'il contient ne va pas à la profondeur nécessaire. On n'y trouve pas mis en lumière le trait le plus fondamental de la théorie de la relativité : la découverte de l'unité de la structure causale et de la structure spatio-temporelle de l'univers. Je pense que c'est cet aspect de la théorie qui apparaîtra le plus généralement comme son fondement le plus profond et que c'est dans cette direction que se fera l'analyse ultérieure des bases de la théorie, d'autant plus qu'elle s'y rencontrera apparemment avec les problèmes soulevés par la physique quantique ». Voir également l'intervention d'Alexandrov au congrès de Berne sur le cinquantenaire de la relativité dans le recueil *Fünfzig Jahre Relativitätstheorie*, Bâle 1956 (*N.d.l.R.*).

NOS AUTEURS

Jakob Ilitch FRENKEL (1894-1952), ancien élève de l'Univer-sité de Léningrad, membre correspondant de l'Académie des Scien-ces de l'U.R.S.S., était un des physiciens théoriciens soviétique les plus connus.

Alexandre Danilovitch ALEXANDROV, né en 1912, ancie élève de l'Université de Léningrad — dont il est actuellement rec-teur —, membre correspondant de l'Académie des Sciences d l'U.R.S.S., physicien théoricien de formation, est spécialiste de mathématiques et s'occupe beaucoup de la philosophie des science

Lajos JANOSSY, né en 1912, est membre de l'Académie de Sciences de Hongrie, dont il est secrétaire et dont il dirige l'Insti-tut central de Recherches Physiques. Ancien professeur à l'*Instit for advanced Studies* de Dublin, il enseigne actuellement à l'Unive-sité des Sciences de Eötvös Loránt. Auteur de nombreux travaux su les rayons cosmiques et la physique théorique, notamment *Cosm Rays* (Oxford, 1948) et des contributions aux *Proc. Roy. Soc.*, *Acta Physica* et à *Nuovo Cimento*.

Mario BUNGE, né à Buenos-Aires en 1919, docteur ès science physiques, est l'auteur de recherches de physique atomique et nu-cléaire, ainsi que de travaux sur les fondements de la physique et su la philosophie des sciences. Il est professeur de philosophie d sciences à l'Université de Buenos-Aires et de physique théoriq à l'Université de La Plata.

Kyrill Dmitriévitch SINELNIKOV, né en 1901, ancien élève e l'Université de Crimée, membre de l'Académie des Sciences 'Ukraine, est spécialiste de physique nucléaire et d'électronique; dirige l'institut physico-technique de l'Académie des Sciences 'Ukraine.

Jean-Pierre VIGIER, né en 1920, est Maître de Recherches au Centre National de la Recherche Scientifique. Auteur notamment le *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (thèse de doctorat) et, en collaboration avec L. de Broglie, *La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?*

Alexeï Alexéiévitch ABRIKOSSOV, né en 1928, ancien élève le l'Université de Moscou, docteur ès sciences, est spécialiste de physique théorique. Il travaille à l'Institut Vavilov (Institut des problèmes physiques de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.).

Isaak Markovitch KHALATNIKOV, né en 1919, ancien élève de l'Université de Dniepropétrovsk, docteur ès sciences, est spécialiste de physique théorique à l'Institut Vavilov.

Serge Vassiliévitch VONSOVSKI, né en 1910, ancien élève de l'Université de Léningrad, membre correspondant de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., spécialiste renommé du magnétisme, est professeur à l'Université de l'Oural à Sverdlovsk et dirige la section de physique théorique de l'Institut de Physique des Métaux de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. (filiale de l'Oural).

George Alexeiévitch KOURSANOV, né en 1914, docteur ès sciences philosophiques, est professeur de philosophie à la filiale de l'Oural de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. et à l'école régionale du P.C.U.S. de Sverdlovsk.

6

SOMMAIRE

La photographie qui illustre notre couverture rep sente un appareil de mesure de la densité c neutrons au centre de Saclay. Le cliché nous a aimablement fourni par le Service de Presse Commissariat à l'Energie Atomique.

Le directeur-gérant : Jean ETENDAI

N° 218. — Imprimerie G. Gouin, Villiers-le-Bel (S.-et-O.). — 4e trim.

DEJA PARU :

Cahier n° 1 : Les origines du fascisme.

Cahier n° 2 : Etat et classes dans l'Antiquité esclavagiste.

Cahier n° 3 : Problèmes de l'automatisation.

★

A PARAITRE :

Le capitalisme moderne. Quelques questions actuelles.

Etudes sur la religion et l'Eglise.

Musique (courants musicaux, œuvres et problèmes esthétiques).

Histoire de l'Asie colonisée aux XIXe et XXe siècles.

Philosophie.

Linguistique.

A NOS LECTEURS

Le poids des frais de traduction, de fabrication et de distribution de *Recherches Internationales* ne nous permet plus de maintenir son prix initial et nous contraint, à partir de ce cahier, à porter le prix de vente au numéro à 500 francs.

Cependant, à titre d'effort exceptionnel, le prix de l'abonnement sera maintenu au tarif actuel jusqu'au 31 janvier 1958. C'est-à-dire qu'en vous abonnant rapidement vous paierez l'exemplaire 333 francs au lieu de 500.

Abonnez-vous !

CE qui frappe le plus dans la vie de l'esprit, en ce milieu du XXe siècle, c'est sans aucun doute que plus d'un milliard d'hommes nourrissent leur pensée de la méthode marxiste et que de nombreux Etats ont pris celle-ci pour principe de leur organisation sociale. Le premier but de *Recherches Internationales* est de fournir, sous une forme accessible à un vaste public, des exemples divers de l'apport des chercheurs qui s'inspirent de cette méthode.

Notre second but est de contribuer au développement nécessaire de ces échanges culturels continus et approfondis qui, indispensables au progrès de l'esprit, servent la connaissance réciproque entre les peuples et jouent ainsi un rôle certain dans le maintien de la paix.

Chacun de nos cahiers est consacré à une des sciences de la nature et de l'homme, à un art ou à un grand ensemble de problèmes philosophiques; il est composé de travaux effectués par des chercheurs marxistes des différentes parties du monde. Les textes que nous publions concernent moins la découverte proprement dite ou l'analyse du détail technique que la mise en œuvre de la méthode marxiste matérialiste et dialectique dans une question scientifique ou esthétique donnée.

Aussi éloignés du dogmatisme que de l'indifférence théorique, ces textes ne prétendent pas épuiser, à un moment et dans un secteur donnés, les possibilités de la pensée et de la pratique humaines. Notre conviction est, en effet, que le choc des idées, la critique, la discussion, sont indispensables au développement de la science et de la culture.

En donnant des exemples de l'apport marxiste-léniniste au développement des sciences, de la pensée et de l'art, nous entendons contribuer à l'émulation entre hommes de culture, éveiller des idées, susciter de débats qui, à leur tour, seront des ferments de progrès.

Rédaction-Administration :

LES EDITIONS DE LA NOUVELLE CRITIQUE

95-97, boulevard de Sébastopol, Paris (2e)

Vente aux libraires : 24, rue Racine, Paris (6e)